



Universidad Carlos III de Madrid

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

USO DE ALGORITMOS SCHEDULING EN LA GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

Autor: Juan Enrique Mogue Ruiz

Tutor UC3M: Álvaro Castro González

Tutores Università di Pavia: Marco Della Vedova
Tullio Facchinetti



Quiero dedicar este proyecto, en primer lugar, a mis padres y a mi hermana Laura, porque gracias a ellos he sido capaz de llegar hasta aquí, por permitirme la oportunidad de estudiar esta carrera y por apoyarme en todo momento.

También me gustaría dedicarlo a mis abuelos, Juan, Vicente, Carmen y Rosa, por su cariño.

A Silvia por haber sido la mejor compañía posible durante estos cuatro años y por estar mi lado siempre.

Y por último, a todos los compañeros, en especial a los que se han convertido en amigos, que he conocido a lo largo de estos cuatro años, tanto en Madrid como en Pavia.

Muchas gracias

ÍNDICE

Tabla de ilustraciones	7
1 Resumen	12
2 Abstract.....	13
3 Introducción.....	14
3.1 La eficiencia energética	14
3.1.2 Razones para la eficiencia energética.....	15
3.2 Motivación.....	21
3.3 Objetivo	22
3.4 Desarrollo del proyecto	23
4 Marco Teórico	24
4.1 Gestión Activa de la Demanda (GAD).....	25
4.1.1 La demanda energética	25
4.1.2 ¿Qué es la Gestión Activa de la Demanda (GAD)?	30
4.1.3 Niveles de la gestión de la demanda eléctrica	32
4.2 Sistemas de tiempo real (Real-Time Systems)	37
4.2.1 Definición	37
4.2.2 Representación gráfica de una tarea en un sistema de tiempo real	39
4.2.3 Paso de parámetros físicos a parámetros temporales	40
4.2.4 Scheduling	44
4.2.5 Clasificación de los algoritmos <i>scheduling</i>	45
4.2.6 Algoritmos <i>scheduling</i> más comunes	47
4.2.7 ¿Qué algoritmo usar, EDF ó RM?	54

2.4.8 De la Informática a la gestión activa de la demanda	57
5 Otros proyectos relacionados con la GAD	61
5.1 Proyecto GAD	62
5.2 Proyecto PRICE.....	65
5.3 Proyecto SMART CITY	66
6 Modelado de los aparatos	67
6.1 Aparatos utilizados	68
6.1.1 Aparatos TT (Time-Triggered).....	70
6.1.2 Aparatos ET (Event-Triggered).....	70
6.2 Modelado físico de los aparatos	71
6.2.1 Modelado físico de aparatos TT (Time-Triggered).....	71
6.2.2 Modelado físico de aparatos ET (Event-Triggered).....	75
6.3 Modelado temporal de los aparatos	79
6.3.2 Modelado temporal de aparatos TT (Time-Triggered).....	80
6.3.2 Modelado temporal de aparatos ET (Event-Triggered).....	82
7 Prueba experimental	83
7.1 Cálculos previos	84
7.1.1 Obtención de los valores numéricos del modelado temporal	84
7.1.2 Partición de las cargas	87
7.1.3 Creación del patrón de uso temporal	90
7.2 Experimento	93
7.2.1 Caso más probable de utilización	94
7.2.2 Peor caso de utilización	95

7.3 Resultados.....	96
7.3.1 Resultados en el caso más probable de uso	97
7.3.2 Resultados en el peor caso posible	100
8 Posibles mejoras y futuro del proyecto.....	103
8.1 Simulación del uso del algoritmo mediante MLE+ y Simulink	104
8.1.1 Pasos a seguir y ejemplo.....	105
8.2 Implantación del algoritmo en varios edificios simultáneamente o en grandes edificios	109
9. Conclusiones.....	111
Bibliografía.....	112

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Modos de conseguir el ahorro energético. Fuente: Elaboración Propia...	14
Ilustración 2: Evolución y previsión de la demanda global energética.Fuente: IEA, WEO 2012	16
Ilustración 3: Evolución y previsión de la población mundial.Fuente: World population prospects: The 2010 Revision.....	16
Ilustración 4: Evolución del precio de la electricidad en España y la Unión Europea (2008-2013). Fuente: Diario El País,17 de diciembre de 2013	17
Ilustración 5: Emisiones de CO2 por sectores en 2010. Fuente: IEA CO2 Highlights..	18
Ilustración 6: Gasto energético global. Fuente: EERE Building Energy Data Book	19
Ilustración 7: Consumo energético medio en los hogares Españoles en el año 2013. Fuente: idea	20
Ilustración 8: Curva de la demanda energética en un día laboral. Fuente: REE	26
Ilustración 9: Curva de la demanda energética en un día festivo. Fuente: REE.....	26
Ilustración 10: Curva de la demanda energética en un día laboral en invierno. Fuente: REE.....	27
Ilustración 11: Curva de la demanda energética en un día laboral en verano. Fuente: REE.....	27
Ilustración 12: Evolución de la demanda energética española (1989-2013). Fuente: REE	29
Ilustración 13: Esquema explicativo y representación gráfica de una tarea en tiempo real. Fuente: Elaboración propia.....	39
Ilustración 14: Esquema de la relación entre el mundo físico y un sistema en tiempo real. Fuente: Elaboración propia.....	40

Ilustración 15: Ejemplo gráfico del paso de variables Físicas a temporales. Fuente: Elaboración Propia	42
Ilustración 16: Ejemplo del uso del algoritmo Rate Monotonic. Fuente: Elaboración propia.....	52
Ilustración 17: Ejemplo del uso del algoritmo Earliest Deadline First. Fuente: Elaboración propia.....	53
Ilustración 18: Comparación del rendimiento de los algoritmos EDF Y RM en número de interrupciones frente al número de tareas simultaneas.Fuente: Giorgio C. Buttazzo	55
Ilustración 19: Comparación del rendimiento de los algoritmos EDF Y RM en número de interrupciones frente a la carga del procesador. Fuente: Giorgio C. Buttazzo	56
Ilustración 20: Relación entre el uso de algoritmos scheduling en la informatica y la gestión activa de la demanda energética. Fuente: Elaboración Propia.....	57
Ilustración 21 Ejemplo sencillo de la representación gráfica de cargas eléctricas sin el uso del algoritmo scheduling.Fuente propia.....	59
Ilustración 22: Ejemplo sencillo de la representación gráfica de cargas eléctricas con el uso del algoritmo scheduling.Fuente propia.....	59
Ilustración 23: Representación Gráfica del funcionamiento del proyecto GAD. Fuente: Proyecto GAD	63
Ilustración 24: Análisis de la tasa de equipamiento en hogares españoles. Fuente: Análisis del consumo energético del sector residencial en españa.IDAE	68
Ilustración 25: Modelado físico de un sistema de aire acondicionado en una habitación de 26 m2 con una temperatura impuesta de 24, 5°C±0,5°C. Fuente: M.L. Della Vedova, T. Facchinetti, Real-Time scheduling for peak load reduction in a large set of HVAC loads	74
Ilustración 26: Modelado físico de un frigorífico con una temperatura impuesta de 4°C±1°C. Fuente: M.L. Della Vedova, T. Facchinetti, Real-time scheduling for peak load reduction in a large set of HVAC loads.....	74

Ilustración 27: Modelado físico de una lavadora a 40°C, con un pico de demanda de 2300W Fuente: M.L. Della Vedova, T. Facchinetti, Real-time scheduling for peak load reduction in a large set of HVAC loads.....	76
Ilustración 28: Modelado físico de una lavavajillas, con un pico de demanda de 2200W Fuente: M.L. Della Vedova, T. Facchinetti, Real-time scheduling for peak load reduction in a large set of HVAC loads.....	77
Ilustración 29: Modelado físico de una horno eléctrico con una temperatura de uso de 180°C, con un pico de demanda de 2200W Fuente: M.L. Della Vedova, T. Facchinetti, Real-time scheduling for peak load reduction in a large set of HVAC loads	78
Ilustración 30: Resultados numéricos de los valores temporales de los cinco electrodomésticos. Fuente: Elaboración propia.....	86
Ilustración 31: Implementación del algoritmo FFDH, creación de los grupos a planificar. Fuente: Elaboración propia	88
Ilustración 32: Representación gráfica de la implementación del algoritmo FFDH. Fuente: Elaboración propia.....	89
Ilustración 33: Patrón de uso temporal de la lavadora en hogares españoles. Fuente: Estudio sobre Consumo Energético del Sector Residencial en España. IDAE.....	90
Ilustración 34: Patrón de uso temporal del lavavajillas en hogares españoles. Fuente: Estudio sobre Consumo Energético del Sector Residencial en España.IDAE.....	91
Ilustración 35: Resumen del patrón de uso temporal de los electrodomésticos en España e Italia. Fuente: Elaboración propia.....	92
Ilustración 36: Perfil de activación temporal y energético en el caso más probable de utilización. Fuente: D. Caprino, M. L. Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances	94
Ilustración 37: Perfil de activación temporal y energético en el peor caso de utilización. Fuente: D. Caprino, M. L. Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances	95
Ilustración 38: Perfil de activación temporal y energético en el caso más probable de utilización sin la implementación del algoritmo scheduling. Fuente: D. Caprino, M. L.	

Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances.....	97
Ilustración 39: Perfil de activación temporal y energético en el caso más probable de utilización con la implementación del algoritmo scheduling. Fuente: D. Caprino, M. L. Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances.....	98
Ilustración 40: Representación gráfica del descenso del pico de demanda energético en el caso más probable de uso.Fuente: Elaboración propia.....	99
Ilustración 41: Perfil de activación temporal y energético más detallado en el caso más probable de utilización sin la implementación del algoritmo scheduling. Fuente: D. Caprino, M. L. Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances	100
Ilustración 42: Perfil de activación temporal y energético más detallado en el caso más probable de utilización con la implementación del algoritmo scheduling. Fuente: D. Caprino, M. L. Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances	101
Ilustración 43: Representación gráfica del descenso del pico de la demanda energética en el peor caso de uso. Fuente: Elaboración propia	102
Ilustración 44: Planta del edificio creado con DesignBuilder en la investigación para la mejora de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia	105
Ilustración 45: Vista del edificio creado con DesignBuilder en la investigación para la mejora de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia	106
Ilustración 46: Imagen de la regleta diseñada por la Università di Pavia para la implantación del algoritmo. Fuente: Tullio Facchinetti: "Real-Time Physical Systems: Energy Efficiency and Load Management in the modern Smart Grid"	107
Ilustración 47: Salida de la simulación del control de un sistema de aire acondicionado con MLE+ y Simulink. Fuente: Elaboración propia	108
Ilustración 48: Descenso teórico del pico de la demanda en el peor caso posible en un escenario de cinco hogares simultaneos. Fuente: D. Caprino, M. L. Della Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances.....	110



1 RESUMEN

En una sociedad cada vez más concienciada con el medio ambiente y con una crisis económica mundial aún presente, la importancia de un uso más responsable de la energía unido a la complicada situación económica y el aumento del precio de la energía han producido un auge en las iniciativas que buscan la eficiencia energética.

La eficiencia energética busca disminuir el consumo energético sin que ello perjudique el bienestar del usuario, consiguiendo un balance entre el progreso y el respeto al medio ambiente.

El objetivo de este proyecto es la búsqueda de la mencionada eficiencia energética mediante el descenso del pico de la demanda.

Para ello se utilizarán los algoritmos *scheduling*, tan comunes en la informática, para gestionar de manera activa las cargas eléctricas que los electrodomésticos producen en un hogar convencional.

Se busca desplazar, en la medida de lo posible y sin perjudicar al usuario, dichas cargas hacia horarios con poca demanda energética, intentando suavizar la curva de demanda energética a lo largo del día.

Este nivelado solucionaría uno de los grandes problemas de las compañías energéticas, ya que con la tecnología actual el almacenamiento de la energía es sumamente costoso y complicado, lo que provoca que estas empresas tengan que generar a lo largo del día cantidades de energías muy cercanas al pico diario esperado, teniendo que deshacerse de los excedentes de energía cuando la cantidad demandada es inferior a dicho pico.

En este proyecto se han realizado dos experimentos en dos escenarios diferentes, el primero en el caso más probable de uso en un hogar común y en el segundo en el peor caso admitido por el algoritmo.

En el primer escenario se ha obtenido un descenso teórico del pico de un 13% y en el segundo escenario un descenso del 40%.

2 ABSTRACT

In an society increasingly concerned with the environment and with a global economic crisis still present, the importance of a more responsible energy use together with the difficult economic situation and the rising of the energy price have led to a boom in initiatives aimed at energy efficiency.

Energy efficiency aims to reduce energy consumption without affecting the welfare of the user, achieving a balance between progress and respect for the environment.

The objective of this project is to search for the aforementioned energy efficiency by lowering the peak demand.

To do this, the scheduling algorithms, which are common in computing, are used to actively manage the electrical charges that appliances produce in a conventional home.

Aim is to move, as far as possible without harming the user, such loads to moments with a low energy demand, trying to smooth the curve of energy demand throughout the day.

This leveled would solve one of the greatest problems of energy companies, because with the current technology, energy storage is extremely expensive and complicated, causing companies to generate throughout the day amounts of energy very close to the expected daily peak, having to get rid of surplus energy when the quantity demanded is less than the peak.

In this project we have done two experiments in two different scenarios, the first one is in the most likely case of use in a common home, the second one it is in the worst case allowed by the algorithm.

In the first scenario has been obtained a theoretical peak decrease of a 13% and in the second scenario a decrease of a 40%.

3 INTRODUCCIÓN

3.1 LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética es el conjunto de iniciativas y programas que tienen como objetivo reducir el consumo energético de ciertos sistemas y productos sin que se vea perjudicado el rendimiento de los servicios que ofrecen, ya que en tal caso no sería eficiencia energética, sino sacrificio energético, véase Ilustración 1.

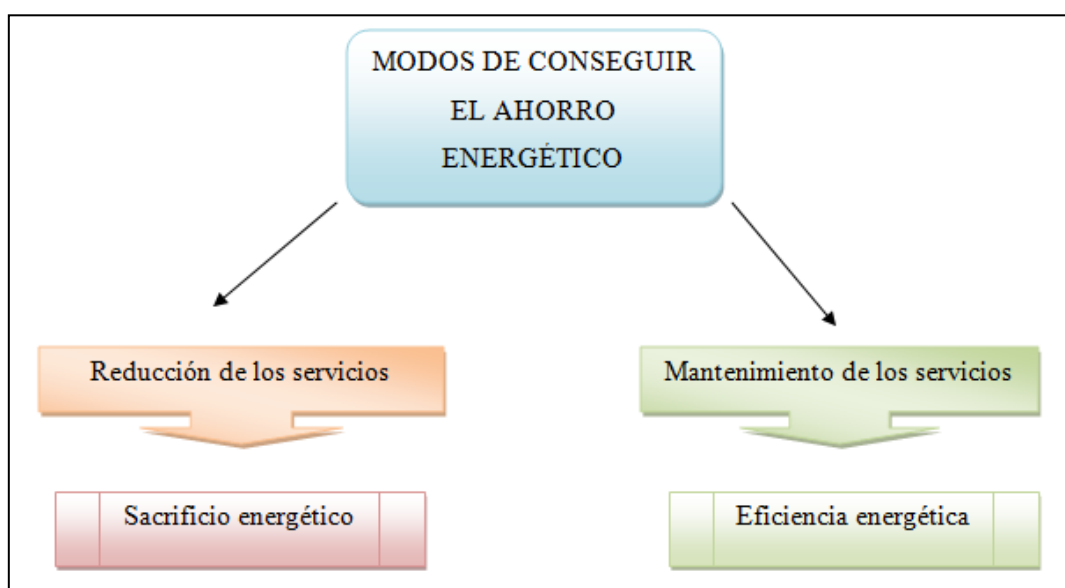


ILUSTRACIÓN 1: MODOS DE CONSEGUIR EL AHORRO ENERGÉTICO. FUENTE:
ELABORACIÓN PROPIA

En los últimos años se ha producido un gran crecimiento de la demanda energética, debido principalmente al aumento de la población mundial y al desarrollo global, pero se debe cambiar y mejorar el modo de utilizar y producir la energía, solo así se podrá hacer frente a esta demanda de una manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

La mayor concienciación de la sociedad por el medio ambiente, el aumento del coste energético y un escenario de crisis económica generalizada está propiciando la

búsqueda de la denominada eficiencia energética en todos los ámbitos de nuestra sociedad, desde el hogar familiar hasta en grandes empresas y fábricas.

3.1.2 RAZONES PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Existen multitud de razones por las que la búsqueda de la eficiencia energética está siendo cada vez más importante en nuestra sociedad, estas son quizás las razones más influyentes: el desarrollo mundial, el precio de la energía y la preocupación por el medio ambiente.

EL DESARROLLO GLOBAL

El consumo energético está experimentando gran un crecimiento, no observado en periodos anteriores, según las previsiones realizadas por la Unión Europea durante el período 2000-2030 la demanda mundial de energía aumentará a un ritmo aproximado del 1,8% anual. [1]

A pesar de la crisis económica actual, en las últimas décadas el desarrollo económico e industrial ha sido altísimo, a esto debemos añadir el crecimiento de potencias emergentes como Brasil, China o la India, países que actualmente ocupan una parte muy importante en la demanda energética global y que tienen una previsión de crecimiento muy significativa como se puede apreciar en la ilustración 2:

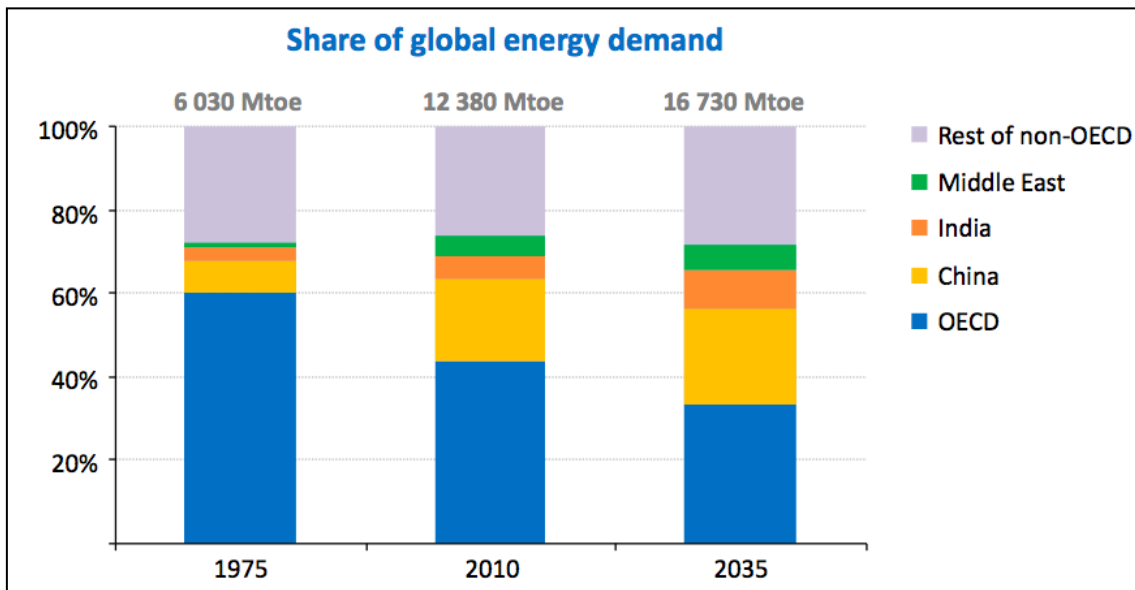


ILUSTRACIÓN 2: EVOLUCIÓN Y PREVISIÓN DE LA DEMANDA GLOBAL
ENERGÉTICA.FUENTE: IEA, WEO 2012

Además de este crecimiento económico e industrial, hay que sumar el increíble crecimiento de la población mundial, especialmente en estos países en desarrollo, y por ende, un aumento en el consumo energético. Según la previsión realizada por la División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA) de Naciones Unidas en el año 2025 la población mundial alcanzará los 8.100 millones de habitantes y en el año 2050 los 9.600 millones. [2]

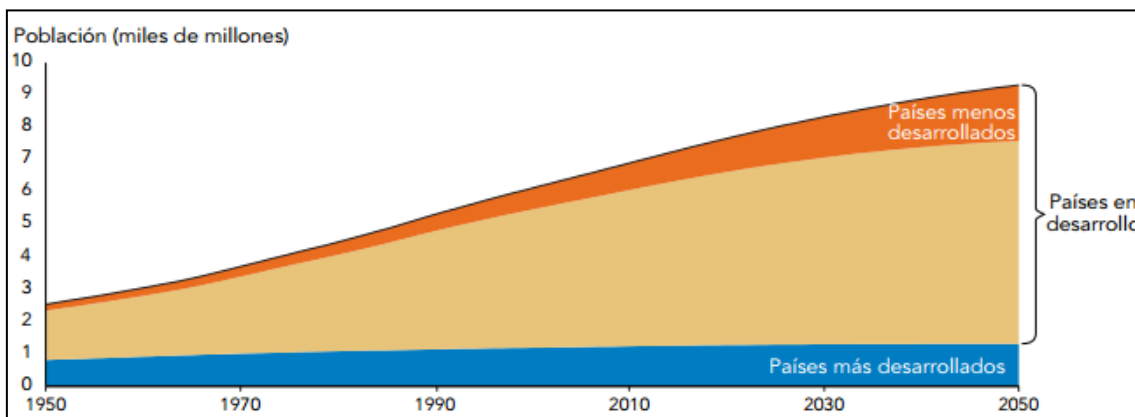


ILUSTRACIÓN 3: EVOLUCIÓN Y PREVISIÓN DE LA POBLACIÓN MUNDUAL.FUENTE: WORLD
POPULATION PROSPECTS: THE 2010 REVISION

EL PRECIO DE LA ENERGÍA

El precio de la energía y de la electricidad crece cada año, como podemos observar en la ilustración 4:

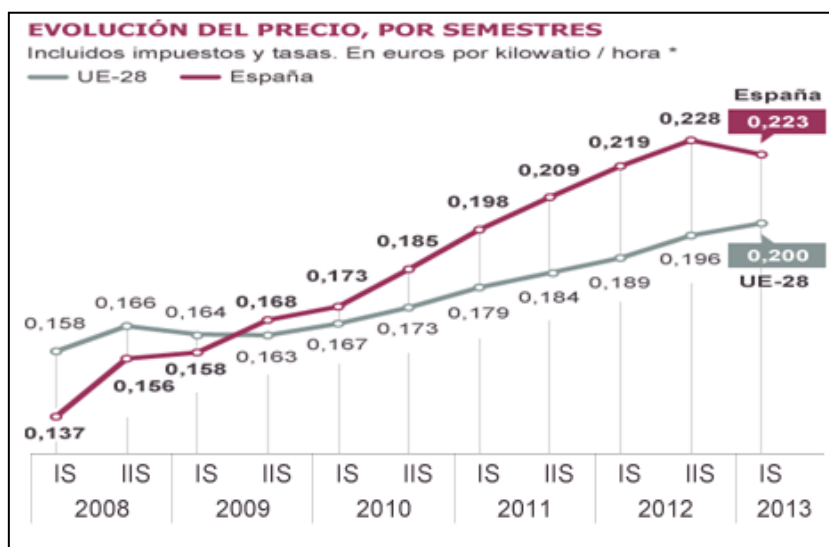


ILUSTRACIÓN 4: EVOLUCIÓN DEL PRECIO DE LA ELÉCTRICIDAD EN ESPAÑA Y LA UNIÓN EUROPEA (2008-2013). FUENTE: DIARIO EL PAÍS, 17 DE DICIEMBRE DE 2013

El precio de la electricidad en España es sustancialmente superior a la media europea, esto se debe principalmente a la manera en la que el precio de la energía se regulaba hasta abril del año 2014. [3]

Hasta entonces, cada tres meses, se producía una subasta eléctrica en la que el precio de la electricidad era regulado para ajustar el déficit existente en la tarifa entre ingresos y gastos, además de esta subasta hay que añadir el peaje eléctrico que establece el gobierno.

Este déficit, el cual actúa directamente sobre el precio que paga el consumidor, es abonado por el estado a las compañías energéticas y supone un gran desembolso anual en los presupuestos del Estado, de hecho, en el año 2013 según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) cifró dicho déficit en 4.098 millones de euros, frente a los 3.600 millones de euros que el Gobierno Español había previsto. [4]

Por esta subida de los precios, los usuarios, tanto empresas como consumidores de a pie cada vez buscan más un uso eficiente de la energía, que les permita seguir con sus hábitos energéticos habituales sin sufrir el crecimiento anual de los precios.

EL MEDIO AMBIENTE

La preocupación social en el aspecto medioambiental respecto a problemas como la contaminación ha crecido en las últimas décadas, problemas como el agujero en la capa de ozono han calado en la población, haciéndola más sensible a una cuestión considerada de gran importancia por todos los organismos globales.

La concentración de CO₂ ha aumentado un 34% desde la revolución industrial, es por eso que iniciativas como el protocolo de Kioto o el Plan de acción para la eficacia energética de la Unión europea se ha comprometido a disminuir el gasto energético y las emisiones de gases invernadero, como el CO₂.

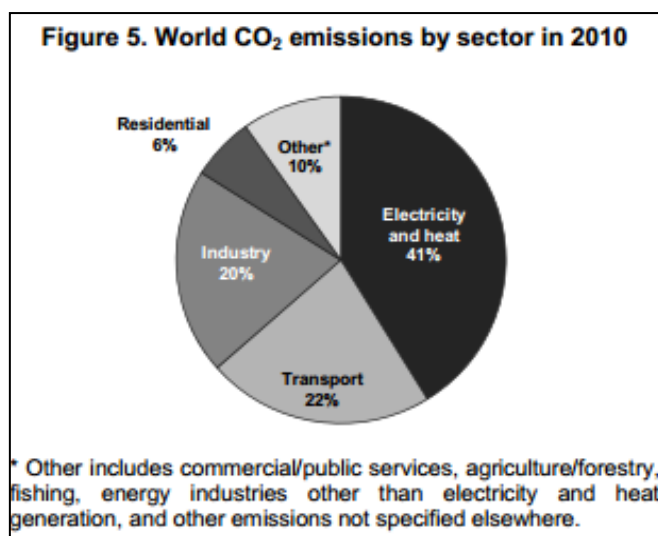


ILUSTRACIÓN 5: EMISIONES DE CO₂ POR SECTORES EN 2010. FUENTE: IEA CO₂
HIGHLIGHTS

El plan propuesto por la Unión Europea espera reducir el consumo de energía en 20% para el año 2020; la única manera de lograrlo, sin perder prestaciones es la implantación tanto a nivel institucional como a nivel social, es la apuesta por la eficiencia energética, logrando una sociedad aún más comprometida en el uso responsable y eficiente de la energía.

LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL HOGAR

Según los datos del *EERE Building Energy Data Book*, el consumo energético global se divide de la representada en la ilustración 6:

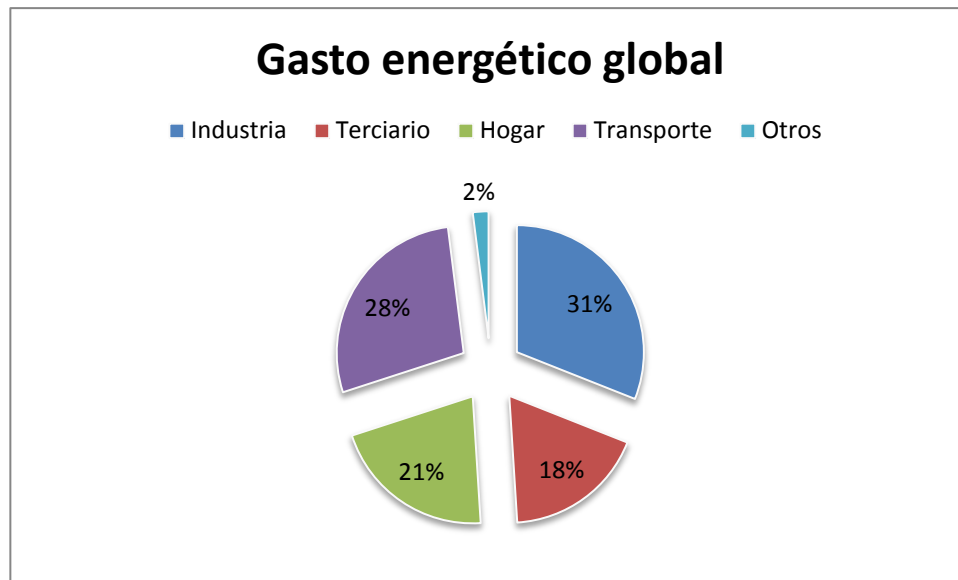


ILUSTRACIÓN 6: GASTO ENERGÉTICO GLOBAL. FUENTE: EERE BUILDING ENERGY DATA BOOK

Por lo tanto, un 21% del gasto energético global proviene de los hogares, es decir, la aplicación de la eficiencia energética en el hogar conllevaría a un gran ahorro a nivel global en términos de energía.

Si consultamos los datos proporcionados por IDAE [5], encontramos un amplio análisis de las fuentes de consumo de los hogares españoles, que utilizaremos como modelo en esta investigación.

Consumo medio en los hogares españoles en el año 2013 [GW/h]		
Calefacción	4.418	7,4%
Agua caliente sanitaria	4.480	7,5%
Cocina	5.572	9,3%
Refrigeración	1.400	2,3%
Iluminación	7.045	11,7%
Electrodomésticos	33.099	55,2%
Standby	3.969	6,6%

ILUSTRACIÓN 7: CONSUMO ENERGÉTICO MEDIO EN LOS HOGARES ESPAÑOLES EN EL AÑO 2013. FUENTE: IDEA

Casi un 56% de la energía total utilizada en los hogares españoles proviene del uso de los electrodomésticos, convirtiéndose así en el mayor gasto energético de las familias españolas. Es por ello que un uso eficiente de estos electrodomésticos, ya sea con la sustitución por aparatos más eficientes o por utilización de sistemas o protocolos que racionalicen su uso, se conseguiría un ahorro altamente significativo.

3.2 MOTIVACIÓN

Actualmente y con la crisis económica mundial aún presente, tanto las empresas como el ciudadano de a pie busca el ahorro económico, a poder ser sin que ello repercuta en su comodidad.

A su vez vivimos en una sociedad cada vez más concienciada por el medio ambiente, en la cual la preocupación por el consumo de las reservas naturales y la contaminación ha aumentado progresivamente a lo largo de los últimos años.

Dadas estas preocupaciones y necesidades, el proyecto de crear hogares cada día más respetuosos con el medio ambiente a la par que se mantiene, incluso se aumenta, el confort de los usuarios hace de esta solución un tema muy interesante y con mucho futuro en nuestra sociedad.

A todo esto hay que añadir el interés en esta tecnología de las grandes empresas energéticas mundiales, ya que serían las grandes beneficiadas de estos avances. Un descenso del pico de la demanda energética, principal objetivo de este proyecto, provocaría en estas empresas un ahorro anual importantísimo, ya que podrían rediseñar sus instalaciones, produciendo menos energía de la que producen actualmente manteniendo su capacidad de cubrir la demanda.

Es decir, y a modo de resumen, el uso de algoritmos que permitan el descenso del pico de la demanda energética es un avance tecnológico que beneficiaría a todas las partes, tanto a los usuarios como a las empresas energéticas, manteniendo a su vez un compromiso con el medio ambiente, ya que una menor generación energética significaría un significativo descenso de los recursos naturales utilizados y por ende, menor contaminación.

Finalmente y desde mi punto de vista, como estudiante del grado en electrónica industrial y automática, siempre he estado muy interesado en la domótica, a esto se le une un gran interés por el medio ambiente, por lo que encontré este trabajo ideal para mis intereses y mi formación

3.3 OBJETIVO

Llegados a este punto podemos observar que nuestro proyecto tiene un objetivo claro, la demostración de la utilidad de los algoritmos scheduling en el descenso del pico de la demanda energética, pero a su vez existe otro objetivo no menos importante.

Como ya se ha comentado, existen tres principales beneficiarios de este proyecto que son:

- [LAS EMPRESAS ENERGÉTICAS](#): Un descenso del pico de la demanda energética significaría un descenso de sus necesidades de generación de energía, sin perjudicar su capacidad de cumplir con la demanda, es decir, reduciendo su generación de energía, seguirían siendo capaces de suministrar la cantidad necesaria.
- [EL USUARIO](#): El usuario seguiría manteniendo su nivel de confort a la par que se beneficiaría de una supuesta disminución del precio de la energía.
- [EL MEDIO AMBIENTE](#): El descenso de la necesidad de generación energética significaría un menor uso de los recursos naturales y una bajada de la contaminación.

Existe un concepto, cada vez más común en nuestros días, del cual los principales beneficiarios son los tres elementos que acabamos de nombrar.

Este concepto es la **eficiencia energética**, el cual es también objetivo de este proyecto.

La eficiencia energética es un concepto que cada día tiene más importancia en nuestra sociedad y el uso de los algoritmos scheduling para el descenso del pico de la demanda energética es solo uno de los muchos caminos que existen para alcanzarla.

3.4 DESARROLLO DEL PROYECTO

Este proyecto se ha desarrollado conjuntamente durante mi estancia Erasmus entre la Università di Pavia y mi tutor Álvaro Castro en la Universidad Carlos III. En Italia mis tutores han sido Tullio Facchinetti y Marco Della Vedova, profesores del departamento de Robótica y Automática de la Università di Pavia.

En este departamento he podido colaborar en su investigación sobre las diferentes técnicas en la reducción del pico de demanda energética.

Cabe destacar que en un principio se me encargó la tarea de evolucionar el proyecto que aquí se presenta, investigando sobre programas que permitan realizar mejores simulaciones y que proporcionen unos resultados más fiables de la utilización de los algoritmos scheduling en la gestión activa de la demanda energética.

Durante los primeros meses ese fue mi trabajo, hasta que los creadores del software que se me encargó utilizar, MLE+, del que se hablará en este proyecto, nos informaron que el desarrollo de dicho programa había quedado parado, imposibilitando el progreso de este proyecto.

Debido a este imprevisto, durante los últimos meses de mi estancia Erasmus, mis tutores me propusieron desarrollar, investigar y mejorar todos sus avances en el campo de los algoritmos scheduling para la gestión activa de la demanda energética, es por esto que un importante número de las referencias citadas en este texto provienen de mis dos tutores.

Estas dificultades me han permitido dominar las bases teóricas de este tema a la vez que he conseguido investigar y formarme en los futuros avances que se sucederán en este campo, una vez se reemprenda el desarrollo del software a utilizar.

4 MARCO TEÓRICO

En este apartado se presentarán los dos pilares teóricos que sustentan este proyecto y que son necesarios para la comprensión y desarrollo del estudio a realizar.

En un primer lugar se hablará de la gestión activa de la demanda energética (GAD), ya que es el modo mediante el cual conseguiremos el objetivo de este proyecto, el descenso del pico de la demanda energética.

Una vez explicado este punto pasaremos a hablar de los sistemas de tiempo real y sus algoritmos scheduling, donde realizaremos una breve introducción a dichos sistemas y una clasificación de los algoritmos existentes.

Por último, elegiremos cual es el algoritmo óptimo a utilizar y explicaremos las similitudes y diferencias entre el uso de estos algoritmos en la informática y en la GAD.

4.1 GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA (GAD)

4.1.1 LA DEMANDA ENERGÉTICA

En términos energéticos, la red eléctrica debe tender a mantener un equilibrio entre la aportación de energía eléctrica y la demanda. Es complicado, por no decir imposible, generar en tiempo real la cantidad exacta de energía que se demanda, es por ello que el equilibrio anteriormente mencionado debe conseguirse aportando a la cantidad de energía generada a tiempo real, una suma de energía previamente producida.

La problemática de esta solución es que a día de hoy, con la tecnología actual, la capacidad de almacenamiento de los sistemas eléctricos es muy baja, por lo que se debe generar una cantidad de energía muy superior a la finalmente demandada, para satisfacer posibles picos de consumo o demandas superiores a las esperadas.

La demanda eléctrica varía siguiendo diversos factores, los más importantes son la hora del día, si se trata de un día festivo o laboral y la estación del año. Estos cambios provocan significativas diferencias entre la máxima (pico) y la mínima demanda (valle).

Se puede observar, en estas ilustraciones, la diferencia de la curva de demanda de la red eléctrica española según si el día es laboral o festivo o si se trata de verano o invierno.

-Diferencia entre un día laboral y festivo:

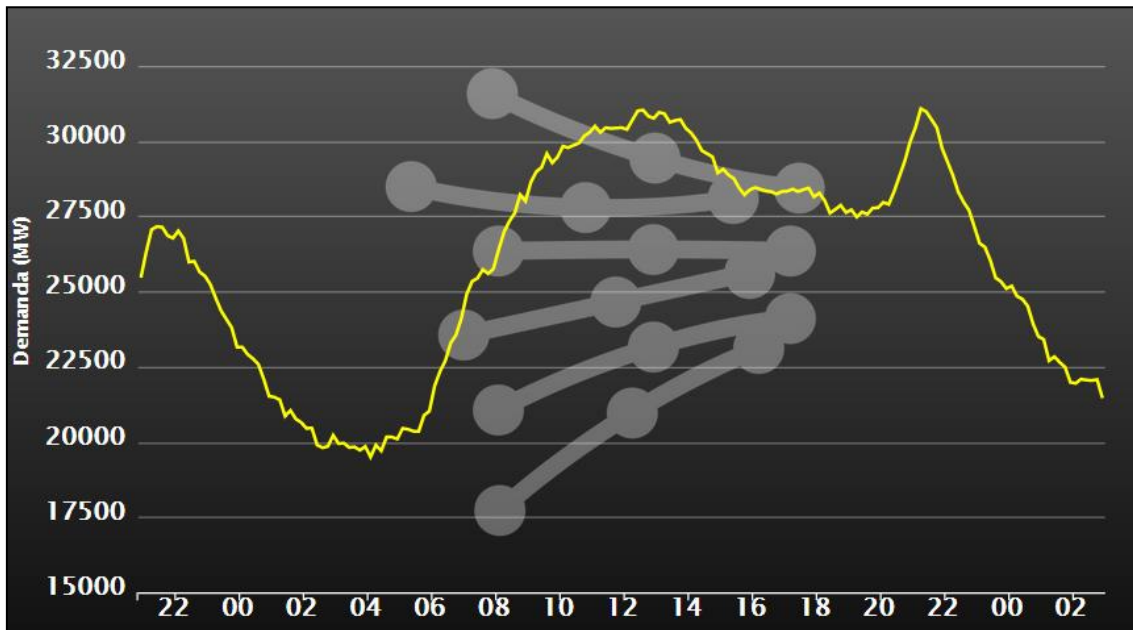


ILUSTRACIÓN 8: CURVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN DÍA LABORAL. FUENTE:
REE

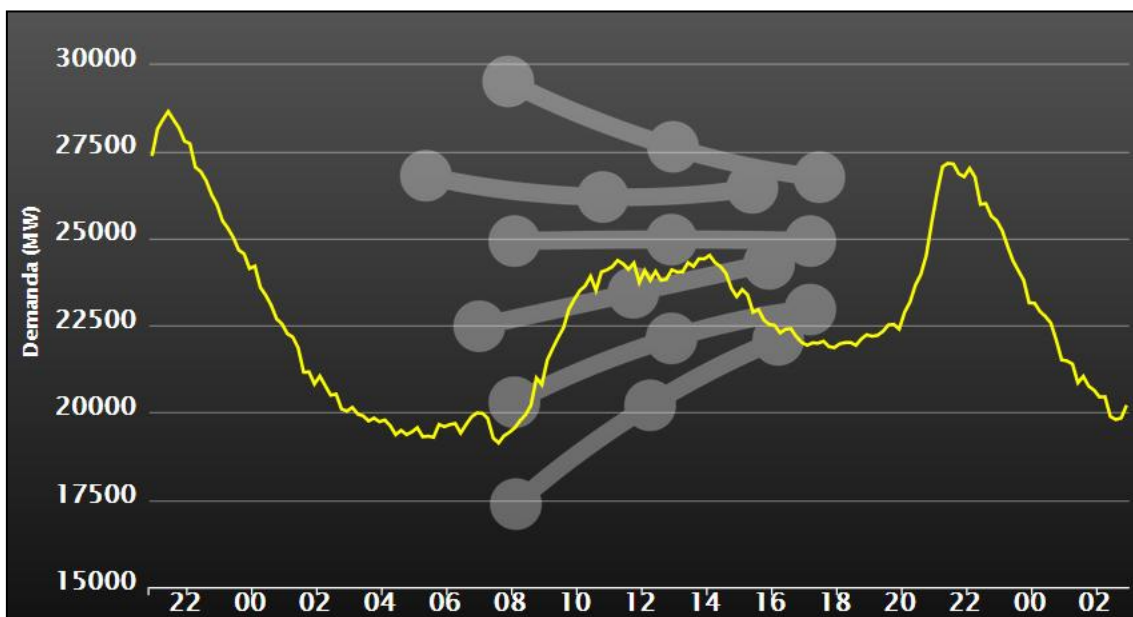


ILUSTRACIÓN 9: CURVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN DÍA FESTIVO. FUENTE: REE

Donde se observa un pico de demanda en día laboral de unos 31200 MW, a diferencia de los 27300 MW en un día festivo. Respecto al valle, la demanda es muy similar, cercana a los 19000 MW

- Diferencia entre día laboral en verano y en invierno:

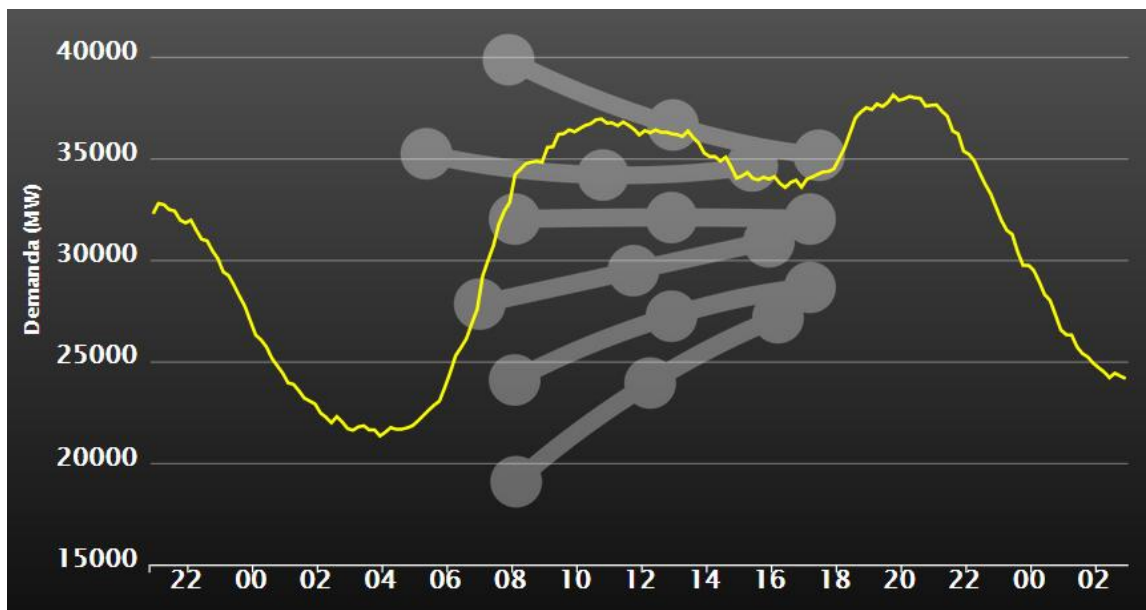


ILUSTRACIÓN 10: CURVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN DÍA LABORAL EN
INVIERNO. FUENTE: REE

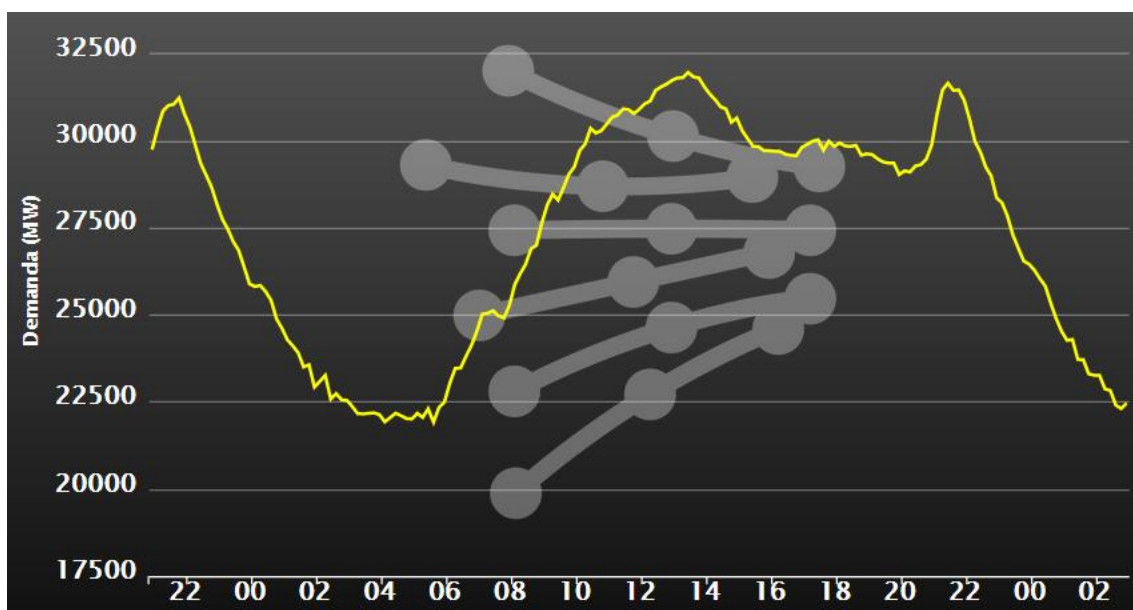


ILUSTRACIÓN 11: CURVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN DÍA LABORAL EN
VERANO. FUENTE: REE

Se observa un pico en la demanda invernal de unos 38000 MW, en cambio en verano el pico apenas supera los 32000 MW.

En estas gráficas se puede apreciar la gran diferencia entre el pico de demanda y el valle que unido a la imposibilidad de almacenar grandes cantidades de energía causa que la gran mayoría del tiempo se esté generando energía que posteriormente no se va a consumir, lo que provoca que el sistema de generación energético del país (y a su vez global, ya que adolece de la misma problemática) esté sobredimensionado en relación a la demanda real, implicando un sobre coste, a estas escalas, de millones de euros.

Además, la demanda eléctrica está directamente ligada al desarrollo económico y social, una sociedad con una demanda eléctrica alta suele relacionarse con una sociedad desarrollada, con una potente industria y con un nivel y calidad de vida alto.

De hecho no es extraño encontrar estadísticas que relacionan la demanda de energía eléctrica de un país respecto a su actividad económica y PIB.

Es por esto, que es fácil apreciar un significativo aumento en las curvas de demanda en las últimas décadas a lo largo y ancho de todo el mundo.

En nuestro país, dado el crecimiento tanto económico y social experimentado en las últimas dos décadas, la cantidad de energía eléctrica demandada ha aumentado, como se puede observar en la ilustración 12, salvo a partir del año 2008, año en el que estalló la archiconocida burbuja inmobiliaria, con su consiguiente crisis que ha afectado y sigue afectando a nuestro país, provocando un descenso de la actividad económica nacional y por ende, de la energía eléctrica necesitada.

En la ilustración 12 podemos apreciar la evolución de la demanda eléctrica en los últimos 25 años, gracias a los datos proporcionados por la REE (Red Eléctrica de España) [6]:

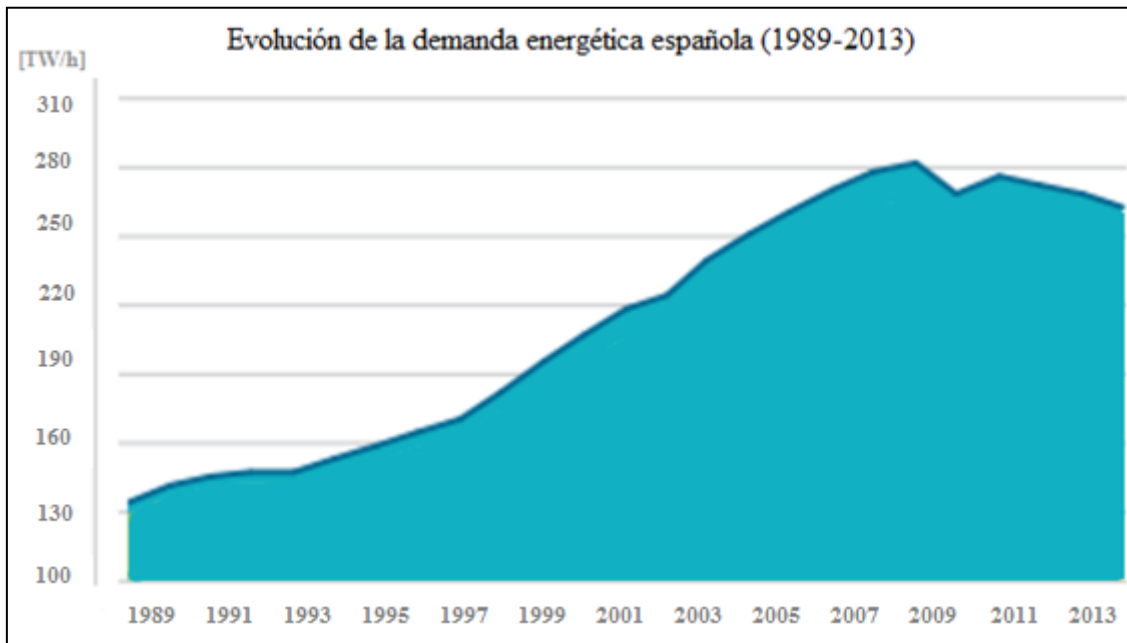


ILUSTRACIÓN 12: EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA ESPAÑOLA (1989-2013).

FUENTE: REE

Se puede apreciar claramente la evolución al alza desde el año 1988 hasta el año 2008, año donde comenzó la crisis económica.

4.1.2 ¿QUÉ ES LA GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA (GAD)?

Una vez comprendidos los conceptos de eficiencia eléctrica y demanda eléctrica, es cuando podemos introducir uno de los pilares de nuestro trabajo, la gestión de la demanda eléctrica.

Como hemos podido observar en el apartado anterior, las curvas de demanda tienen grandes diferencias entre sus regiones valle y su pico. El objetivo de la gestión de la demanda eléctrica es reducir ese desnivel y conseguir poco a poco un aplanamiento de la curva de demanda eléctrica, lo que conllevaría a una reducción del gasto energético y una mejor utilización de los recursos, tanto en términos de utilización de centrales de generación de energía como en gestión de recursos utilizados para la obtención de energía, con la consiguiente reducción a su vez de la contaminación ambiental.

Esta gestión es un tema de actualidad en la comunidad científica y eléctrica, podemos encontrar varios nombres que hacen referencia a este concepto:

- Demand Response (DR)
- Demand Side Management (DSM)
- Demand Side Bidding (DSB)
- Demand Side Integration (DSI)

La gestión de la demanda eléctrica comprende multitud de iniciativas y medidas técnicas con el fin de conseguir el objetivo previamente expuesto pero a su vez busca convertir al usuario en un miembro activo de este ahorro a nivel energético y económico.

Es común en nuestra sociedad percibir como los consumidores no son conscientes de las razones por las cuales sus tarifas eléctricas varían periódicamente o incluso el por qué el coste de la energía cambia a lo largo del día, por estas razones, se hace impensable que

el consumidor se conciencie respecto a qué patrón de uso energético debe utilizar para colaborar con el sistema energético general.

Esta desconexión entre los mercados mayoristas y la comercialización de la electricidad se traduce en una curva agregada de demanda prácticamente inelástica [7].

El objetivo final, en este sentido, es que el consumidor acabe cambiando sus hábitos domésticos, desplazando su consumo a horas donde el sistema general está menos sobrecargado y donde las tarifas son más reducidas, adecuándose así a los intereses generales del sistema eléctrico, para beneficio mutuo.

Este cambio en los hábitos energéticos de la sociedad provocaría poco a poco no solo el anteriormente mencionado aplanamiento de la curva de la demanda sino también evitaría el cambio en las infraestructuras de las redes de distribución y transporte, ya que a pesar del previsto crecimiento económico en los próximos años, debido al desarrollo en gran parte industrial, la red actual sería capaz de soportar esta nueva demanda gracias a este aprovechamiento eficiente de la energía.

En resumen, los beneficios que puede producir la gestión activa de la demanda son cuantiosos, según una de las empresas más importantes del sector energético español y una de las impulsoras de este sistema, Iberdrola, la implantación de estas medidas tendría los siguientes beneficios en la red [8]:

- Reducción de los costes de operación del sistema
- Optimización de las infraestructuras
- Mejora de la seguridad de suministro
- Desarrollo de la conciencia de la sociedad acerca del coste de generación en periodos de demanda punta
- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero

4.1.3 NIVELES DE LA GESTIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA

La Comunidad de Madrid junto a la agencia Europea de la gestión de la energía (Energy Management Agency) crearon en 2007 una clasificación de los distintos niveles de la gestión de la demanda energética, en función de la interacción entre el sistema energético y el consumidor, los cuales enumeraremos a continuación [9]:

NIVEL 1: PROGRAMAS DE AHORRO Y EFICIENCIA

Nivel donde se engloban la gran mayoría de los programas dedicados a la gestión de la demanda, se trata de proyectos encaminados al aumento de la eficiencia energética de equipos eléctricos. Estos proyectos se centran solo en reducir la potencia consumida ya que no toman en consideración los horarios de consumo, por ello se tratan de programas con repercusión a largo plazo en el sistema eléctrico.

Algunos ejemplos de programas dentro de este nivel pueden ser:

- Plan Renove de Electrodomésticos de la Comunidad de Madrid en 2006¹
- Plan Renove de Maquinaria Industrial de la Comunidad de Madrid²
- Plan de Certificación Energética de Edificios³
- Distribution Network Avoidance (Anglesey) en Reino Unido por MANWEB⁴

¹

http://www.madrid.org/cs/Satellite?c=CM_Actuaciones_FA&cid=1142540548619&idConsejeria=1109266187242&idListConsj=1109265444710&idOrganismo=1109266227096&language=es&pagename=ComunidadMadrid%2FEstructura

²

http://www.madrid.org/cs/Satellite?c=CM_Actuaciones_FA&cid=1142540548619&idConsejeria=1109266187242&idListConsj=1109265444710&idOrganismo=1109266227096&language=es&pagename=ComunidadMadrid%2FEstructura

³ <http://www.idae.es/index.php/relcategoria.3980/id.717/relmenu.344/mod.pags/mem.detalle>

NIVEL 2: PROGRAMAS DE CONTROL DE CONTROL DE CARGAS ELÉCTRICAS MEDIANTE TARIFICACIÓN

Se trata de programas que se basan en el hecho de informar al consumidor del precio de la energía que consume. Existen multitud de programas, que establecen cada uno diferentes rangos de precios dependiendo del momento del día. Estos programas pueden ser preestablecidos por contrato o variables, siguiendo las directrices de los precios del mercado eléctrico a tiempo real.

Los programas más comunes en este segundo nivel son:

- [TARIFAS DE PERÍODO DE UTILIZACIÓN \(TOU\)](#): Tarifas donde se establecen diferentes bloques de horas con diferentes precios, por ejemplo, el uso de una tarifa nocturna.
- [TARÍFAS DE PRECIOS DE MOMENTO CRÍTICO \(CPP\)](#): Se trata de tarifas donde a los periodos de mayor consumo y donde los costes de producción son muy elevados, se aplica una tarifa muy alta, buscando así que el consumidor traslade sus necesidades energéticas a otros momentos del día para su propio beneficio, ayudando así a evitar una grandes cargas en el sistema y reduciendo los picos.
- [TARÍFAS CON PRECIOS EN TIEMPO REAL \(RTP\)](#): En estas tarifas el consumidor recibe periódicamente el precio de la electricidad que va a consumir, siendo así el consumidor el que elige en que periodos del día es más conveniente el uso energético.

Ejemplos de programas de este nivel son:

- Programa TOU en Italia por ENEL⁵

⁴ http://www.seai.ie/Publications/Energy_Policy_Publications/Demand_Side_Management/KEMA_Appendices.pdf

⁵ <http://www.s3c-project.eu/News/52/ToUIItaly.html>

- Critical Peak Pricing⁶

NIVEL 3: PROGRAMAS DE CONTROL INDIRECTO DE CARGAS ELÉCTRICAS A TRAVÉS DE CONTRATOS O INCENTIVOS

A este nivel, hablamos de programas en el que las cargas son contraladas indirectamente, forzando al consumidor a disminuir su consumo en determinados momentos del día. El consumidor se debe ceñir a unas reglas impuestas por el proveedor energético, comprometiéndose a reducir el consumo en momentos puntuales si el suministrador así lo requiere. Estas restricciones son comunicadas al usuario con un tiempo previo mínimo de 30 minutos. En estos programas el consumidor, a cambio de tolerar estas normas impuestas, recibe bonificaciones tanto de manera monetaria como de rebajas en el precio total de su tarifa.

Un ejemplo de este tipo de programa es:

- El contrato de Interrumpibilidad de la Red Eléctrica Española (REE)⁷

⁶ <https://www.sce.com/NR/rdonlyres/0BA4FAF7-A5E2-4ACA-B488-0DDC3873D3FE/0/CPPFactSheet.pdf>

⁷ http://www.ree.es/operacion/servicio_interrumpibilidad.asp

NIVEL 4: PROGRAMAS DE CONTROL DIRECTO DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS

En este nivel los proveedores eléctricos desconectan directamente los aparatos eléctricos en función de sus necesidades. Para realizar esta tarea sin perjudicar la comodidad del usuario estas desconexiones son previamente comunicadas al usuario, por lo que se necesita una plena y continuada comunicación entre consumidor y proveedor.

Para hacer más cómodo este sistema, los aparatos electrónicos se agrupan en diversos grupos. El consumidor realiza dos grupos, uno en el que engloba todos los aparatos que no pueden ser apagados y otro con los aparatos que pueden desconectarse durante cortos periodos de tiempo sin perjudicar su rendimiento, generalmente aquellos con inercia térmica, como calefacciones, frigoríficos, HVAC, etc.

Los proveedores de estos contratos, mucho más comunes en Estados Unidos que en Europa, establecen y acuerdan con el consumidor el número y duración de las interrupciones de cada aparato o bloque de aparatos. Los usuarios reciben a cambio grandes rebajas en sus tarifas eléctricas.

Existen multitud de ejemplos en este nivel, por ejemplo:

- Proyecto GAD (Gestión Activa de la Demanda) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España⁸

⁸ http://gad.ite.es/index_es.html

NIVEL 5: PROGRAMAS DE MERCADOS DE GESTIÓN DE LA DEMANDA

En este nivel encontramos los anteriormente mencionamos programas tipo Demand Side Bidding (DSB), en los cuales se permite al usuario participar ofertando reducciones de su consumo, si esta oferta es aceptada por el proveedor, el consumidor deberá reducir su consumo de manera manual. Este tipo de programas están todavía muy poco desarrollados debido a su complejidad.

A este nivel, el programa más usado a escala global es:

- Mercado Day Ahead en USA por ISO New England⁹

⁹ <http://www.iso-ne.com/markets-operations/markets/da-rt-energy-markets>

4.2 SISTEMAS DE TIEMPO REAL (REAL-TIME SYSTEMS)

4.2.1 DEFINICIÓN

Un sistema de tiempo real es un sistema informático que interacciona con su entorno físico y responde a los estímulos del entorno dentro de un plazo de tiempo determinado [10].

El comportamiento de un sistema de tiempo real no depende únicamente de su lógica sino que también es fundamental el tiempo en el cual es capaz de realizar dicha tarea. En un sistema de tiempo real existen limitaciones temporales que deben ser satisfechas, dichas restricciones temporales, llamadas comúnmente como “deadlines”, dependen de la interacción entre el sistema digital y el proceso físico a medir, por esto un resultado que es numéricamente correcto pero que se da demasiado tarde puede causar errores, por ejemplo, si el sensor de aparcamiento de un coche tiene un periodo de actualización de 10 minutos no podríamos considerarlo como un sistema de tiempo real, ya que a pesar de que su lógica puede ser correcta y por lo tanto capaz de avisar al conductor cuando se aproxima a un obstáculo, el periodo de los sensores de distancia y por ende la interacción entre el sistema digital y el proceso a medir no es el adecuado, obteniendo así un sistema no válido y erróneo.

Es muy importante diferenciar, dentro de los sistemas de tiempo real, los dos tipos de tareas que se pueden llevar a cabo:

- TAREAS DE TIPO “HARD”: En las cuales un incumplimiento de las restricciones temporales puede tener consecuencias graves en el funcionamiento del sistema. En este tipo de tareas la validación es fundamental, es decir, debemos preguntar al sistema si en el peor de los casos todas las restricciones temporales se cumplirán. Por ejemplo, el

sistema de ayuda al aparcamiento que hemos mencionado con anterioridad, en el cual un incumplimiento de las restricciones temporales provoca el incorrecto funcionamiento del sistema.

- TAREAS DE TIPO “SOFT”: En las cuales un incumplimiento de las restricciones temporales es tolerable, dentro de unos límites establecidos. En general, en este tipo de tareas, las restricciones temporales suelen indicar el máximo rendimiento del sistema, por lo que cualquier incumplimiento de dichas restricciones solo implica una pérdida del rendimiento total del procedimiento. Por ejemplo, en un sistema de tiempo real, como puede ser un streaming de video el video genera 30 frames por segundo, si debido a un error en el sistema de tiempo real existen momentos donde se generan 25 frames por segundo, el funcionamiento seguirá siendo correcto, si bien es cierto que el rendimiento no será el óptimo, el usuario difícilmente apreciará este pequeño error.
- TAREAS DE TIPO “FIRM”: En las cuales un incumplimiento de las restricciones temporales es tolerable ya que si la tarea no se realiza en el momento definido, es completamente inútil para el sistema, es decir, ni perjudica ni mejora el rendimiento del sistema en general.

En un sistema de tiempo real también debemos diferenciar los dos tipos de restricciones temporales que existen:

- RESTRICCIONES EXPLÍCITAS: Son restricciones formuladas explícitamente por el problema. Por ejemplo, supongamos que para el correcto funcionamiento del sistema de aparcamiento se necesita una frecuencia de muestreo del sensor de 40 ms, esa sería nuestra restricción explícita.
- RESTRICCIONES IMPLÍCITAS: Son restricciones que aparecen de manera implícita en el problema. Por ejemplo, supongamos que el sensor de aparcamiento debe ser capaz de identificar objetos a una distancia mínima de 5 cm.

4.2.2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA TAREA EN UN SISTEMA DE TIEMPO REAL

En el uso de sistemas de tiempo real es fundamental la representación gráfica de las tareas. Normalmente estos sistemas de tiempo real funcionan de manera simultánea con otros sistemas (lo que da lugar a sistemas de tipo “*Scheduling*” que veremos posteriormente), por lo que una correcta representación gráfica hace más sencillo para el operador la comprensión del conjunto de sistemas.

La representación gráfica de una tarea sigue el esquema presentado en la ilustración 13:

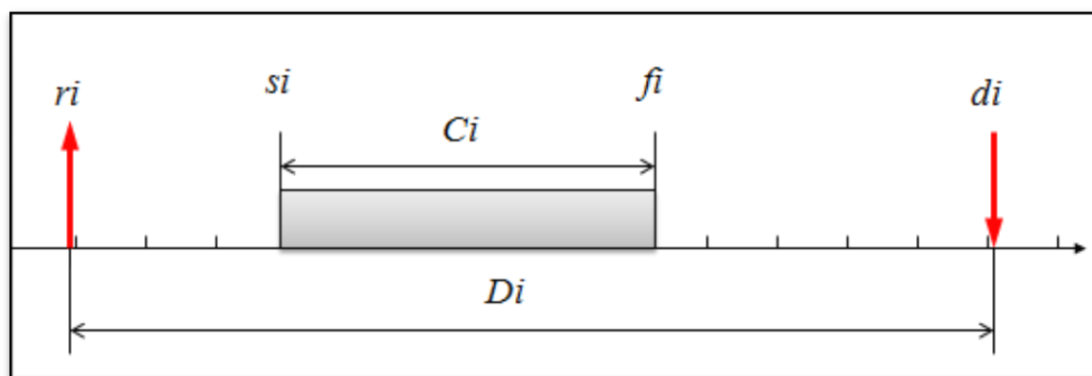


ILUSTRACIÓN 13: ESQUEMA EXPLICATIVO Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA TAREA EN TIEMPO REAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Siendo:

- Parámetros absolutos:
 - r_i : Tiempo de llegada
 - s_i : Tiempo de inicio
 - d_i : Deadline absoluto
 - f_i : Tiempo de final
- Parámetros relativos:
 - C_i : Tiempo de ejecución en el peor de los casos (WCET)
 - D_i : Deadline relativo

4.2.3 PASO DE PARÁMETROS FÍSICOS A PARÁMETROS TEMPORALES

En un sistema de tiempo real se pasa de parámetros físicos a parámetros temporales, cualquier acción cotidiana se puede transformar a parámetros temporales y por lo tanto, convertirse en un sistema de tiempo real, siempre y cuando sea factible alcanzar las restricciones temporales que dicho sistema necesita.

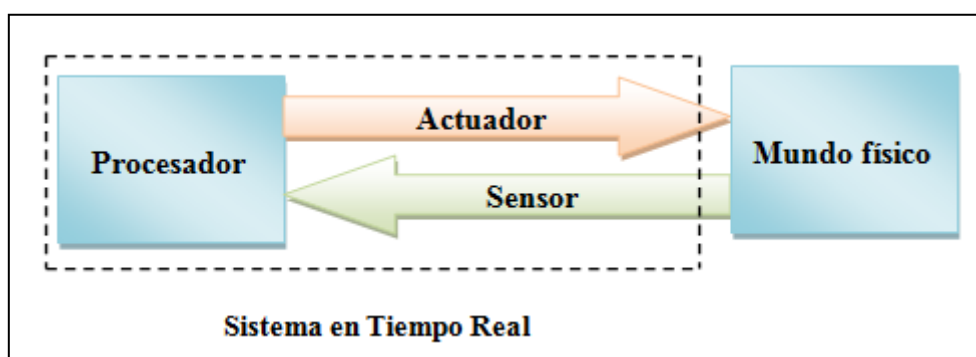


ILUSTRACIÓN 14: ESQUEMA DE LA RELACIÓN ENTRE EL MUNDO FÍSICO Y UN SISTEMA EN TIEMPO REAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Veamos a continuación un ejemplo práctico que hará más fácil entender este proceso.

Imaginemos una persona que está corriendo por la noche, por lo que su rango de visión no es tan amplio como por el día, equipararemos ese rango de visión al que podría tener el ya mencionado sensor de aparcamiento. Nuestro corredor se aproxima hacia una farola, para evitarla, primero debe verla, es decir, que en su rango de visión se detecte el obstáculo. Una vez el corredor advierte el obstáculo tiene un tiempo y por lo tanto un espacio en el cual debe reducir su velocidad para evitar la colisión.

Este ejemplo tan común se trata de un sencillo problema físico, el cual vamos a transformar en un sistema de tiempo real, donde, el cuerpo y mente del corredor toma el papel que podría tener el procesador de un ordenador y debe gestionar las tareas dentro de unas restricciones temporales para evitar un error en el sistema, que en este caso es la colisión con la farola.

Vamos a plantear primero el problema, para un sistema de tiempo real necesitamos conocer o hallar el tiempo requerido para realizar la tarea, con el fin de conocer si nuestro ordenador (o en este caso nuestro corredor) es capaz de realizar dicha tarea dentro de las restricciones temporales de nuestro sistema.

Empezamos con la ecuación de la distancia recorrida:

$$x(t) = Vt - \frac{1}{2}at^2 \quad (1)$$

Posteriormente con la ecuación de la velocidad:

$$v(t) = V_0 - at \quad (2)$$

Para que nuestro corredor se pare, la velocidad en un tiempo t_1 debe ser igual a 0.

$$v(t_1) = 0 \quad (3)$$

Por lo que el tiempo t_1 debe ser igual a:

$$t_1 = \frac{V}{a} \quad (4)$$

Sustituyendo en (1):

$$x(t_1) = \frac{Vmax^2}{2a} = X_a \quad (5)$$

Por lo tanto, conocemos:

- X_a = Distancia límite de frenado.
- X_s = Distancia de alcance de visión (sensor).
- C_i = Tiempo de ejecución de la tarea (frenado) en el peor caso posible (WCET).

Con esto podemos calcular el máximo tiempo en recorrer la distancia $X_s - X_a$ en el peor caso posible, lo que se conoce como el D_i (Deadline relativo) de nuestra tarea, que es:

$$D_i = \frac{X_s - X_a}{V_{max}} \quad (6)$$

Considerando siempre que $X_s > X_a$ ya que de lo contrario el corredor chocaría con el obstáculo.

Una vez resuelto nuestro problema y habiendo realizado la transformación desde parámetros físicos a parámetros temporales, vamos a representarlo gráficamente en la ilustración 15:

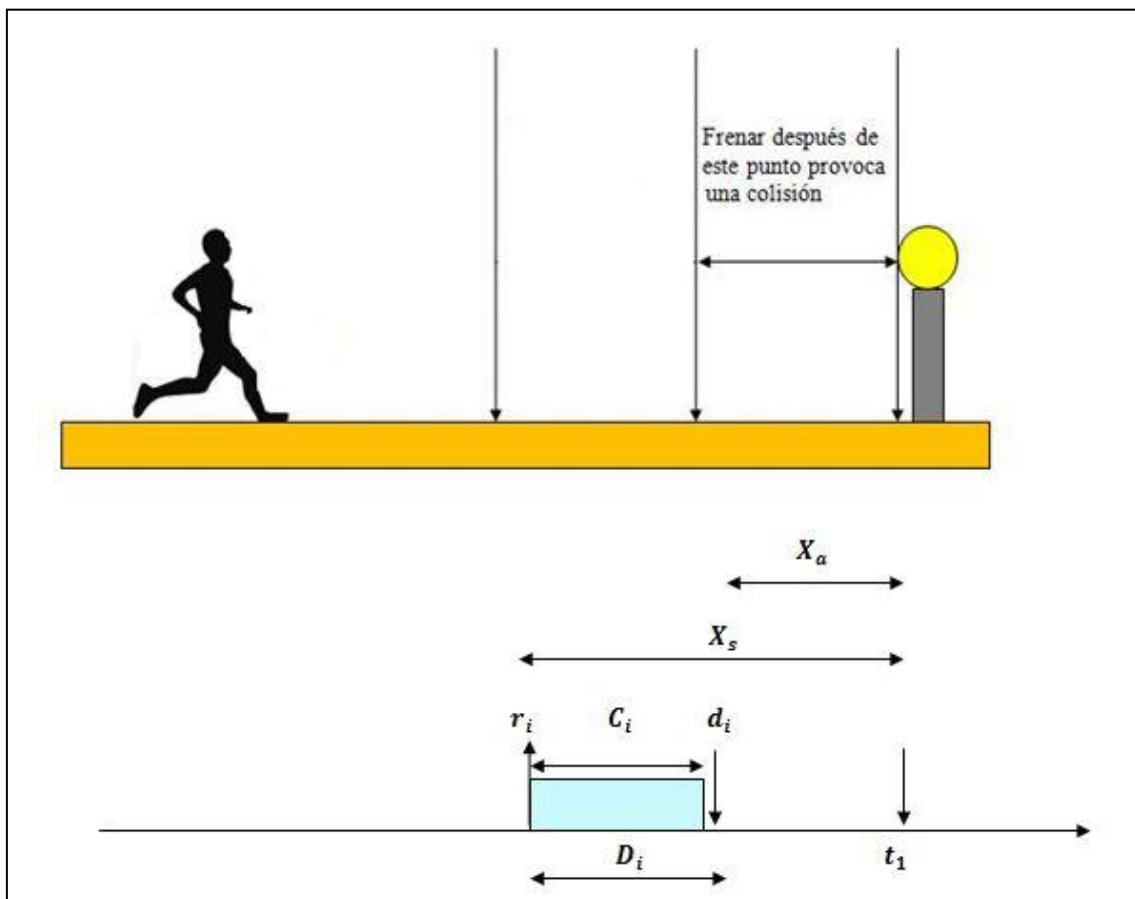


ILUSTRACIÓN 15: EJEMPLO GRÁFICO DEL PASO DE VARIABLES FÍSICAS A TEMPORALES.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Donde:

- X_a = Distancia límite de frenado.
- X_s = Distancia de alcance de visión (sensor).
- C_i = Tiempo de ejecución de la tarea (frenado) en el peor caso posible.
- d_i = Último momento para frenar sin chocar ($D_i = d_i - r_i$).
- r_i = Momento en el corredor (sensor) detecta el obstáculo.
- D_i = Máximo tiempo en recorrer la distancia $X_s - X_a$ en el peor caso posible.

4.2.4 SCHEDULING

Scheduling es quizá la palabra clave cuando hablamos de sistemas de tiempo real. Su traducción al castellano podría ser planificar o programar una serie de eventos [11].

Cuando tenemos una serie de tareas que realizar de manera simultánea, el procesador necesita organizar o *schedule* esas tareas dentro de las restricciones temporales que exigen esos procesos. En caso de no ser capaz de llevar a cabo esta organización o planificación de las tareas, diremos que nuestro sistema tiene unos recursos insuficientes para la realización, necesitando así, por ejemplo, si se tratase de un ordenador, aumentar la capacidad de procesamiento para obtener una solución correcta a nuestro problema de tipo *scheduling* [12].

Simplificando la definición anterior, consideramos *schedule* a la secuencia de tareas que debe realizar un procesador[13]. Hablando en términos matemáticos *scheduling* significa:

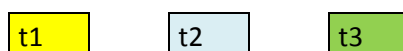
Dado una serie de tareas $\Gamma = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$, *schedule* es una función tal que:

$\sigma : \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{N}$, para la cual, en un periodo de tiempo $[t1, t2)$, se mantiene que:

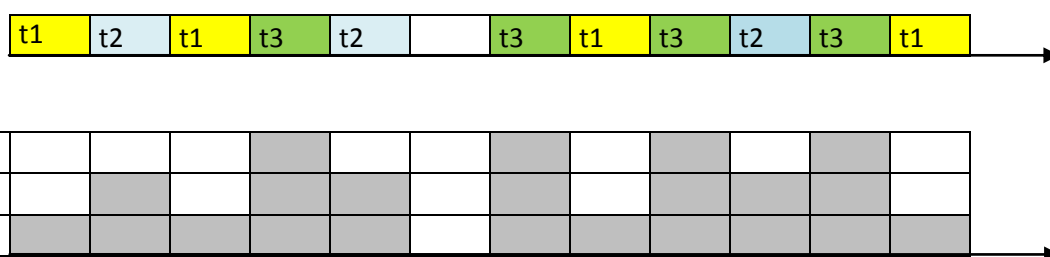
$$\sigma(t) = \begin{cases} k, & \text{si } \tau_k \text{ se procesa en el tiempo } t \in [t1, t2) \\ 0, & \text{si el procesador está libre} \end{cases}$$

Por ejemplo supongamos que:

- La tarea global a realizar está compuesta por tres tareas diferentes que son:



- $\sigma = 0$ cuando no existen tareas a realizar



4.2.5 CLASIFICACION DE LOS ALGORITMOS *SCHEDULING*

Existen multitud de algoritmos de tipo *scheduling*, no existe un algoritmo mejor que otro, sino un algoritmo apropiado, el que nos permite organizar las tareas de manera más óptima, respondiendo a las diferentes características del sistema en tiempo real a tratar.

Ante todo, un algoritmo busca el *scheduling* factible, que quiere decir, un *schedule* que consiga cumplir todas las restricciones temporales de cada una de las tareas del sistema, es decir, dado un conjunto de tareas, si existe un *scheduling* factible, se puede decir que el conjunto de tareas es *schedulable*, que se puede organizar con éxito.

A continuación realizaremos una clasificación de las características más comunes y diferenciadoras de los algoritmos *scheduling*, para facilitar la posterior explicación de los algoritmos más utilizados, utilizaremos una clasificación expuesta en [14], ya que es la referencia utilizada a lo largo de todo este trabajo:

ESTÁTICO O DINÁMICO

- **ESTÁTICO**: Algoritmos donde las decisiones a la hora de ordenar las tareas se basan en parámetros fijos, normalmente referentes a su prioridad en el sistema, asignados previamente a su activación.
- **DINÁMICO**: Algoritmos donde la organización de las tareas se basa en parámetros dinámicos, que podrían cambiar a lo largo de la evolución del sistema, como puede ser su prioridad.

INTERRUMPIBLES Ó NO-INTERRUMPIBLES

- **INTERRUMPIBLES**: Algoritmos donde el procesador puede parar la tarea para ejecutar otra con una prioridad mayor.

- [NO-INTERRUMPIBLES](#): Algoritmos donde si una tarea ha comenzado a ejecutarse, el procesador no puede suspenderla hasta que no haya finalizado.

ONLINE Ó OFFLINE

- [ONLINE](#): Algoritmos donde las decisiones de organización de tareas se realizan cada vez que una nueva tarea entra en el sistema o cuando una tarea en ejecución finaliza.
- [OFFLINE](#): Algoritmos donde la lista de tareas a realizar se almacena de manera previa para ser posteriormente ejecutadas por el procesador, sin posibilidad de actualización una vez comenzado el proceso.

ÓPTIMO Ó HEURÍSTICO

- [ÓPTIMO](#): Un algoritmo se considera optimo si minimiza una función de coste definida sobre el conjunto de las tareas a realizar. Cuando no existe dicha función de coste y el único objetivo es alcanzar un *scheduling* factible, se dice entonces que el algoritmo es óptimo si es capaz de obtener dicho *scheduling* factible, en el caso de que exista.
- [HEURÍSTICO](#): Un algoritmo se considera heurístico si se basa en una función heurística a la hora de tomar decisiones en el proceso de *scheduling*. Se encarga de obtener el mejor resultado posible, intenta obtener el *scheduling* factible pero no garantiza su encuentro.

TAREAS ACCIONADAS POR TIEMPO O POR EVENTO

- [ACCIONADAS POR TIEMPO \(TIME-TRIGGERED\)](#): Algoritmos donde las tareas se activan en función del tiempo, se tratan de tareas periódicas. Por ejemplo, el muestreo de un sensor.
- [ACCIONADAS POR EVENTO \(EVENT-TRIGGERED\)](#): Algoritmos donde las tareas se activan en función de un evento externo, se tratan de tareas aperiódicas o esporádicas. Por ejemplo, el input de un teclado.

4.2.6 ALGORITMOS *SCHEDULING* MÁS COMUNES

El uso de algoritmos scheduling es extremadamente común en multitud de campos, desde el control de sistemas de seguridad en un avión hasta el aparato electrónico más sencillo lo puede utilizar. Es por esto que se hace imposible nombrar cada uno de los algoritmos que existen, si bien es cierto, que en la gran mayoría de aplicaciones encontramos comúnmente los mismos algoritmos.

FCFS, SFJ Y EDD

Existen dos algoritmos muy comunes, FCFS (First Come, First Served), SJF (Shortest Job First) y EDD (Earliest Due Date).

Podemos encontrarlos en multitud de aplicaciones pero no son los más adecuados para nuestro proyecto, ya que necesitamos algoritmos muy dinámicos y con capacidad de preferencia, es decir, algoritmos donde la prioridad pueda cambiar libremente según la situación y algoritmos interrumpibles, que nos permitan la posibilidad de parar y reanudar algunas tareas. Aún así, dada su importancia en otros ámbitos de los sistemas de tiempo real, vamos a exponerlos brevemente [15]:

- FCFS (FIRST COME, FIRST SERVED): Algoritmo donde se establece la prioridad de las tareas según su orden de llegada. Es un algoritmo que no garantiza a priori la ejecución de las tareas en sus restricciones temporales. Sus características son:

- No-Interrumpibles
- Dinámico
- Online
- Heurístico

- SJF (SHORTEST JOB FIRST): Algoritmo donde se establece la prioridad de las tareas según su duración, de manera que la tarea con menor tiempo de ejecución tendrá la mayor prioridad, este algoritmo suele mejorar al FCFS en tiempo de ejecución del conjunto de tareas siempre y cuando se conozca el tiempo que debe usar el procesador, en caso contrario se usa FCFS.

No es un algoritmo óptimo en términos de *schedulibilidad*.
Sus características son:

- Interrumpibles ó No-Interrumpibles
- Estático
- Online ó Offline
- Heurístico

- EDD (EARLIEST DUE DATE): Algoritmo donde se establece la prioridad de las tareas según su deadline relativo, la tarea con menor deadline relativo se convierte en la de mayor prioridad.

Sus características son:

- Interrumpibles ó No-Interrumpibles
- Estático
- Online ó Offline
- Heurístico

ALGORITMOS APERIÓDICOS

Las tareas aperiódicas no tienen una frecuencia cíclica entre eventos. Las interrupciones pueden ocurrir de manera esporádica y los tiempos de procesamiento pueden cambiar dramáticamente. Debido a estas características, no se tratan de algoritmos apropiados para nuestro propósito. Los algoritmos aperiódicos más comunes son:

- Polling ó Sporadic Server
- Total ó Constant Bandwidth Server

ALGORITMOS PERIÓDICOS

En los algoritmos periódicos las tareas tienen las siguientes características:

- Son periódicas.
- Cada vez que se ejecuta una tarea, su WCET o tiempo máximo de ejecución es el mismo.
- Son independientes entre sí.
- Las tareas son interrumpibles
- El tiempo máximo de ejecución de cada tarea es conocido a priori.

En un algoritmo periódico se debe cumplir:

$$C_i \leq R_i \leq D_i = T_i$$

Siendo:

- N : Número de tareas.
- C_i : Tiempo de ejecución en el peor de los casos (WCET)
- T_i : Período de la tarea i .
- D_i : Deadline de la tarea i .

- P_i : Prioridad de la tarea i .
- R_i : Máximo tiempo de respuesta.

En los algoritmos periódicos, la carga soportada por el procesador se mide con el llamado factor de utilización, se trata de la fracción de tiempo que utiliza el procesador para ejecutar el conjunto de tareas periódicas. Se define como:

$$U_i = \frac{C_i}{T_i}$$

Siendo el sumatorio de la utilización de cada tarea, el factor de utilización del sistema en general, U :

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i}$$

Cumpliendo siempre que:

$$U \leq 1$$

Otro factor a tener en cuenta en los algoritmos periódicos es el llamado “límite superior de utilización”, $U_{lub}(A)$, el cual representa cual es el mayor valor de U para que cada tarea sea schedulable ó planificable por el algoritmo a utilizar, es decir:

Para cada conjunto de tareas, si $U \leq U_{lub}(A)$, el conjunto de tareas es planificable por el algoritmo, es lo que llamamos, “schedulability test” o test de planificación.

Como ya sabemos, un algoritmo *scheduling* es óptimo si minimiza la función de coste definida por el conjunto de tareas a planificar, es decir, dado un escenario donde existe una planificación factible, un algoritmo óptimo encontrará siempre esa planificación.

Respecto a la clasificación de los algoritmos periódicos, utilizaremos el criterio según sean óptimos trabajando con tareas de prioridad estática o dinámica, siendo los más importantes:

- En caso de prioridad dinámica el algoritmo más utilizado y óptimo es el llamado Earliest Deadline First (EDF)
- Si trabajamos con prioridades estáticas el algoritmo a utilizar será Rate Monotonic (RM)

En estos dos algoritmos se cumple que el Deadline de cada tarea tiene que ser exactamente igual al periodo de la misma, es decir, $T_i = D_i$.

Más adelante, una vez veamos como aplicamos estos algoritmos a la Gestión Activa de la Demanda (GAD), explicaremos con mayor profundidad las diferencias entre estos algoritmos, a continuación se hará una pequeña introducción:

RATE MONOTONIC (RM):

El algoritmo Rate Monotonic (RM) asigna a cada tarea una prioridad inversamente proporcional a su periodo.

A continuación se presenta un ejemplo de la implantación del algoritmo RM, en el se observan tres procesos diferentes, con diferentes periodos y tiempos de utilización cada uno. La manera de representar estas características es:

$$\tau_i = (C_i, T_i)$$

En este ejemplo las tareas son:

- $\tau_1 = (1, 3)$
- $\tau_2 = (2, 5)$
- $\tau_3 = (2, 9)$

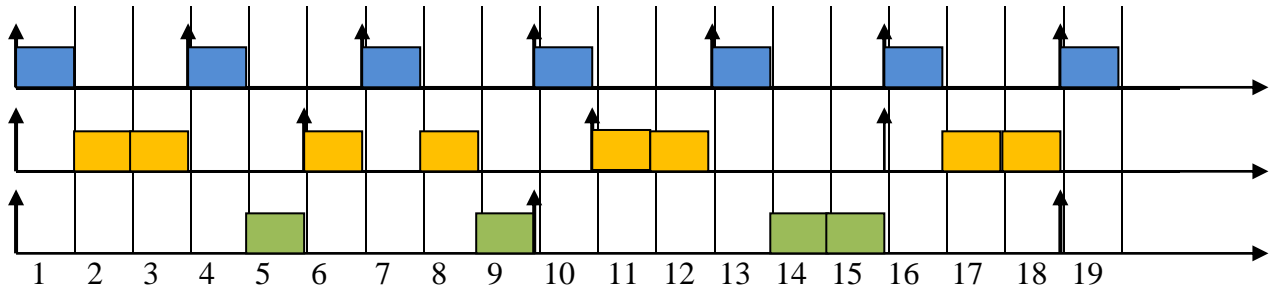


ILUSTRACIÓN 16: EJEMPLO DEL USO DEL ALGORITMO RATE MONOTONIC. FUENTE:
ELABORACIÓN PROPIA

Para este algoritmo, el test de schedulabilidad se realiza así:

- Existe una manera clásica con la fórmula:

$$U \leq Ulub(n) = n(2^{\frac{1}{n}} - 1) < \ln(2)$$

- Y otro modo más actual y aún más preciso:

$$U \leq Ulub(n) = \prod_{i=1}^n (U_i + 1) \leq 2$$

EARLIEST DEADLINE FIRST (EDF):

El algoritmo Earliest Deadline First (EDF) asigna a cada tarea una prioridad inversamente proporcional a su deadline absoluto.

A continuación se presenta un ejemplo de la implantación del algoritmo EDF, en el se observan tres procesos diferentes, con diferentes periodos y tiempos de utilización cada uno.

En este ejemplo las tareas son las mismas que en el anterior:

- $\tau_1 = (1, 3)$
- $\tau_2 = (2, 5)$
- $\tau_3 = (2, 9)$

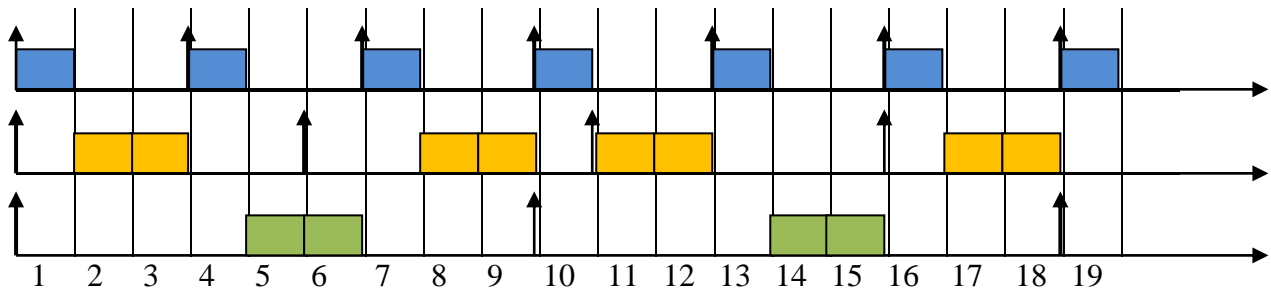


ILUSTRACIÓN 17: EJEMPLO DEL USO DEL ALGORITMO EARLIEST DEADLINE FIRST.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se puede apreciar la diferencia, dadas las mismas tareas, entre la utilización del algoritmo EDF y el algoritmo RM.

El test de schedulabilidad del algoritmo EDF es:

$$U \leq U_{lub}(n) = 1$$

2.4.7 ¿QUÉ ALGORITMO USAR, EDF Ó RM?

Las diferencias y virtudes de los algoritmos EDF (Earliest Deadline First) y RM (Rate Monotonic) han sido tema de discusión en el ámbito científico desde hace mucho tiempo.

En el año 1973, se realizó un estudio [16] que fue referencia durante mucho tiempo, donde se consideraba el algoritmo RM superior al EDF, dando como vencedor al RM sobre el EDF en términos como facilidad de análisis, menor tiempo de computación o mayor predictibilidad en condiciones de sobrecarga.

En el año 2005, un estudio realizado por Giorgio C. Buttazzo en la Università di Pavia, Italia [17] demostró que todos los argumentos anteriormente nombrados eran erróneos y que en la mayoría de los casos el algoritmo EDF es superior al RM, ya que el EDF hace un mejor uso de los recursos y mejora en la mayoría de los escenarios el rendimiento del sistema.

Para nuestro proyecto usaremos el algoritmo EDF, ya que tiene las siguientes características que se adecuan a las necesidades de nuestro sistema:

- El algoritmo EDF garantiza que el Schedule de cargas tendrá una utilización de los recursos eficiente y garantizará una planificación si ésta es posible.
- El algoritmo EDF produce un menor número de interrupciones.

Esta última característica es muy importante en nuestro sistema. Debido a que los aparatos que vamos a utilizar son eléctricos, muchos de ellos tienen en su interior motores eléctricos que se accionan en determinados momentos de su periodo de utilización. Si el algoritmo ejecuta una interrupción para pasar a otra tarea, estos motores sufren una detención instantánea, lo que provoca a la larga el deterioro de los componentes. Otra razón a tener en cuenta respecto a las interrupciones es que existen

determinados momentos dentro de las tareas en los electrodomésticos que no se pueden parar ya que podría afectar a su rendimiento final.

En el informe que hemos tomado como referencia [17], podemos observar que a mayor número de tareas, el algoritmo EDF disminuye el número de interrupciones de manera muy significativa, esto es de gran importancia porque el objetivo de la Gestión Activa de la Demanda con algoritmos *scheduling* es la capacidad de controlar multitud de aparatos, con el fin de ser capaz de utilizarse tanto en casas individuales como en grandes conjuntos de viviendas o fábricas.

En la ilustración 18 podemos apreciar como el algoritmo EDF es superior al RM en términos de menor uso de las interrupciones, sea cual sea el número de tareas, siendo aún más pronunciado cuando superamos las 10 tareas simultáneas.

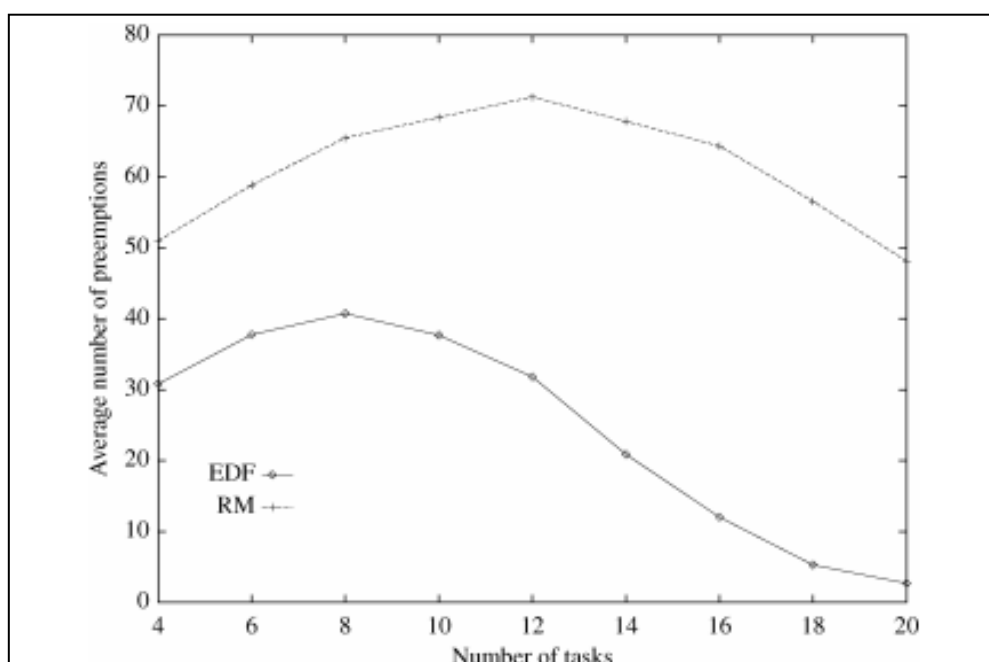


ILUSTRACIÓN 18: COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS ALGORITMOS EDF Y RM EN NÚMERO DE INTERRUPCIONES FRENTE AL NÚMERO DE TAREAS SIMULTÁNEAS. FUENTE: GIORGIO C. BUTTAZZO

En la ilustración 19 observamos cómo el algoritmo EDF provoca un menor número de interrupciones sea cual sea la carga del procesador, siendo aún más destacable a medida que la carga del procesador va aumentando hasta llegar al 100% de su capacidad.

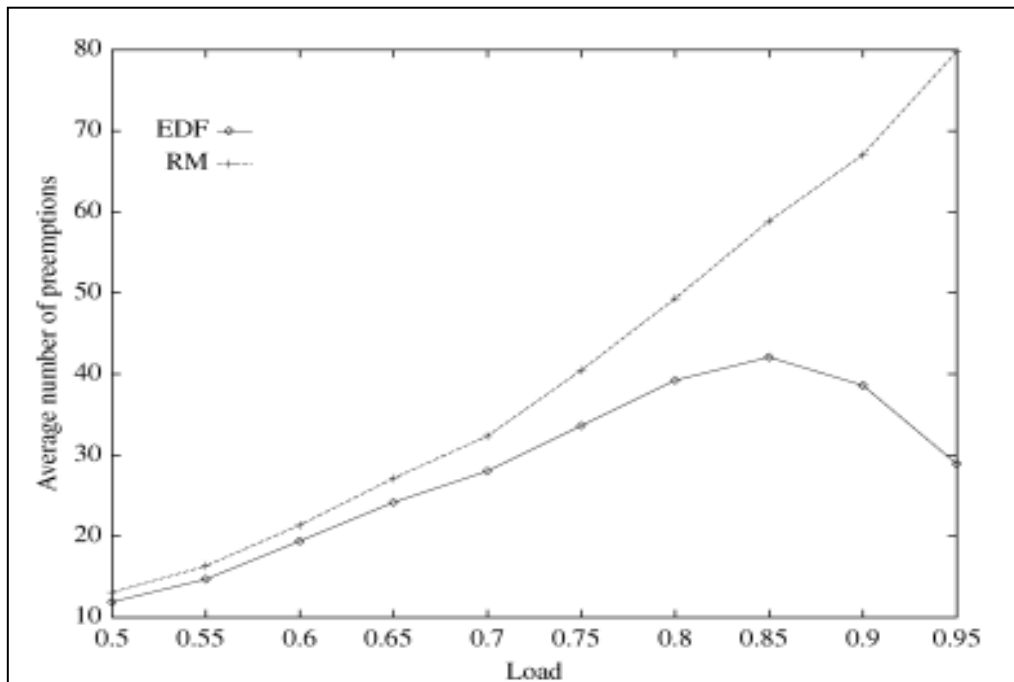


ILUSTRACIÓN 19: COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS ALGORITMOS EDF Y RM EN
NÚMERO DE INTERRUPCIONES FRENTE A LA CARGA DEL PROCESADOR. FUENTE:
GIORGIO C. BUTTAZZO

2.4.8 DE LA INFORMÁTICA A LA GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA

Como ya sabemos, los sistemas en tiempo real y los algoritmos *scheduling* son muy comunes en el ámbito de la informática. Nuestro objetivo es el de adaptarlos en la domótica y la gestión activa de la demanda, a continuación se presenta un símil que hará más fácil su entendimiento.

Los sistemas en tiempo real regulan y planifican la realización de tareas, de modo que todas ellas se puedan completar dentro de unos límites, tanto en términos de recursos como en limitaciones temporales. En términos de la gestión activa de la demanda:

Ámbito	Informática (Computación)	Gestión Activa de la Demanda
Recurso	Procesos	Carga eléctrica
Ci	Tiempo de ejecución	Momento de activación
Ti	Periodo	Periodo
Di	Deadline	Deadline
s(t)	Orden de tareas	Cambio de señal
Objetivo a optimizar	Energía consumida	Pico de consumo

ILUSTRACIÓN 20: RELACIÓN ENTRE EL USO DE ALGORITMOS SCHEDULING EN LA INFORMÁTICA Y LA GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Siendo los conceptos relativos a la GAD:

- Carga eléctrica: El consumo del aparato

- Momento de activación: Instante donde se acciona el aparato
- Periodo: Periodo de activación del aparato
- Deadline: Tiempo límite de ejecución de la tarea del aparato
- Cambio de señal: Apagado/Encendido del aparato
- Pico de consumo: Momento de máximo consumo en un periodo de tiempo

Nuestro objetivo es modelar las variables físicas de los electrodomésticos para poder pasarlas a medidas temporales, como hicimos anteriormente con el ejemplo del corredor, para poder así crear un *schedule* y organizar las diferentes cargas, evitando en la medida de lo posible, momentos con superposición de cargas, con el fin de reducir los picos de consumo.

Un ejemplo sencillo, que resume nuestro objetivo, es el siguiente esquema; consideraremos, para hacerlo lo más sencillo posible, que los tres aparatos tienen el mismo tiempo de ejecución y la misma carga.

Se puede observar como los tres aparatos eléctricos se encienden y se apagan a lo largo del día sin control alguno.

Esto provoca que en algunos momentos, varios de estos aparatos se superpongan, creando picos de tensión en la línea que se pueden traducir en apagones de luz o mayor consumo para el consumidor.

En la parte superior del eje temporal se observan los periodos de ejecución de los tres aparatos, cada uno con un color, en el eje inferior se muestra el consumo energético total en cada momento del día, donde existen momentos en el que varios aparatos se accionan simultáneamente.

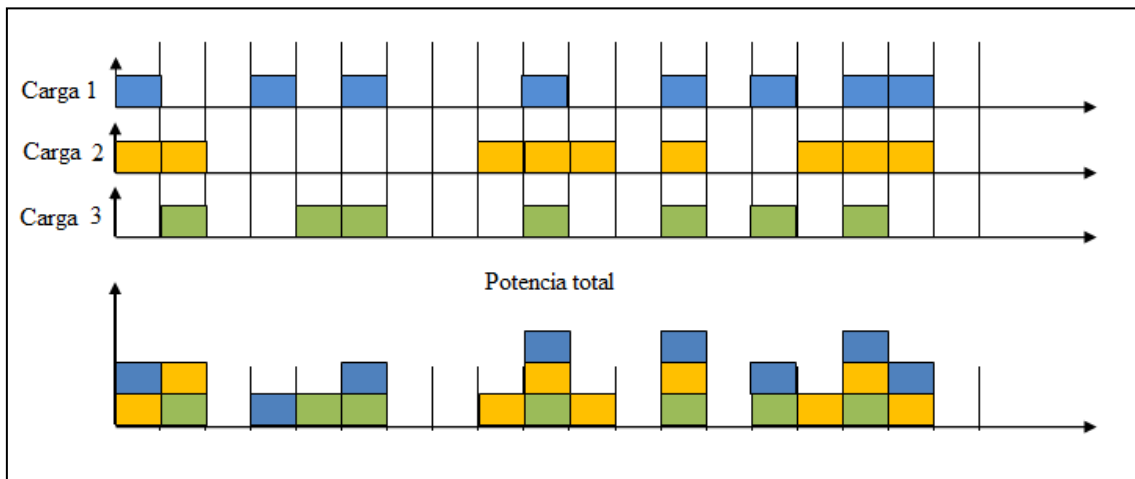


ILUSTRACIÓN 21 EJEMPLO SENCILLO DE LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGAS ELÉCTRICAS SIN EL USO DEL ALGORITMO SCHEDULING.FUENTE PROPIA

En el siguiente esquema podemos observar los mismos tres aparatos, con los mismos periodos de utilización a lo largo del mismo día pero utilizando un algoritmo *scheduling*, como podemos comprobar, el uso de este algoritmo ordena temporalmente las tareas, evitando así que se provoquen picos de tensión.

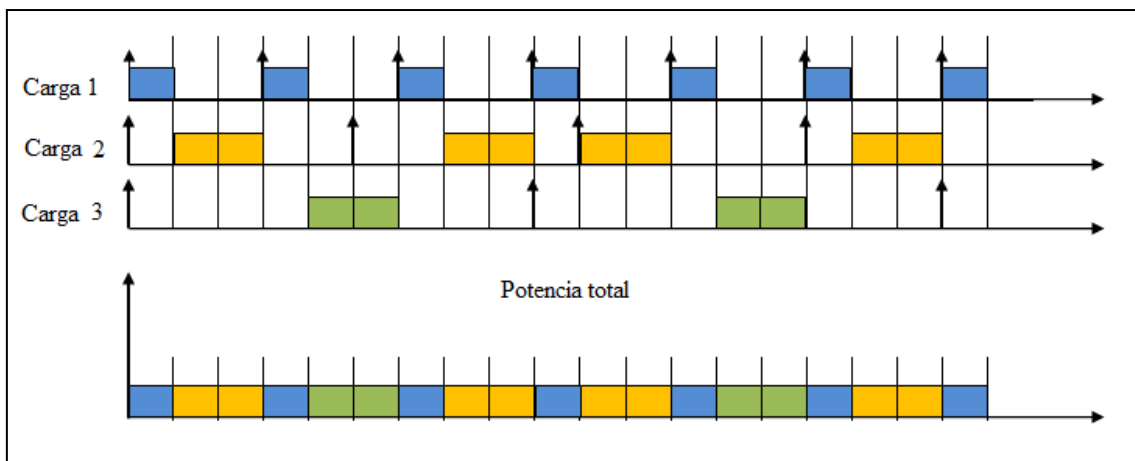


ILUSTRACIÓN 22: EJEMPLO SENCILLO DE LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CARGAS ELÉCTRICAS CON EL USO DEL ALGORITMO SCHEDULING.FUENTE PROPIA

Vamos a suponer unos valores de carga a cada aparato de 1000 W, para hacer aún más gráfica la explicación.

Si este ejemplo fuese un escenario real, podríamos observar que con el uso del algoritmo scheduling nuestro pico de tensión hubiese sido de 1000W, en cambio, sin el uso de la planificación, en el primer esquema, nuestro pico de tensión sería de 3000W.

Por lo tanto, en este escenario imaginario, el uso de algoritmos scheduling hubiese disminuido nuestro pico de demanda significativamente.

5 OTROS PROYECTOS RELACIONADOS CON LA GAD

En este apartado hablaremos brevemente de los diferentes proyectos de GAD que gobiernos y compañías energéticas están llevando a cabo en España. Enumeraremos los proyectos principales junto a una pequeña introducción a las características de cada uno de ellos.

5.1 PROYECTO GAD

El proyecto GAD (Gestión Activa de la Demanda) es un plan financiado por una parte por el Ministerio de Ciencia e Innovación junto con el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y por otra parte por un consorcio de empresas energéticas, siendo Iberdrola la principal promotora de este proyecto.

El proyecto comenzó en el año 2007 con una inversión inicial de unos 23 millones de Euros.

El proyecto busca nivelar la curva de demanda española y evitar así su crecimiento, para ello establece un programa donde la relación entre el usuario, el operador del sistema y el operador de distribución es muy estrecha, buscando el beneficio mutuo entre los tres interesados, necesitándose para esta comunicación sistemas de control inteligentes.

El papel de cada uno de los participantes en este proyecto es [8]:

- [OPERADORES DEL SISTEMA](#): Encargados de promover comportamientos que mejoren el servicio del sistema, realizándolas a través de los distribuidores.
- [DISTRIBUIDORES](#): Tienen la capacidad de acceder de forma remota a los limitadores de potencia de los gestores de consumo de los consumidores, si la situación lo precisa. Tienen la responsabilidad a su vez de comunicarse con el cliente e informarle sobre su consumo y enviarle las consignas necesarias para el buen funcionamiento del sistema.
- [COMERCIALIZADORES](#): Gestionan de manera económica las acciones de gestión de la demanda. Son los encargados de negociar con el usuario la tarifa adecuada a sus necesidades y deben enviar al consumidor la información sobre el precio de la energía que están consumiendo de manera periódica.

- **CONSUMIDORES:** Se benefician de este proyecto gracias al ahorro en términos económicos que provoca y a posibles incentivos proporcionados por el resto de los participantes en el sistema. El usuario a cambio permite que se actúe sobre su red eléctrica, gestionándola, ya sea el mismo o un tercero, según las necesidades del sistema.

El diagrama funcional del proyecto GAD se puede observar en la siguiente ilustración:

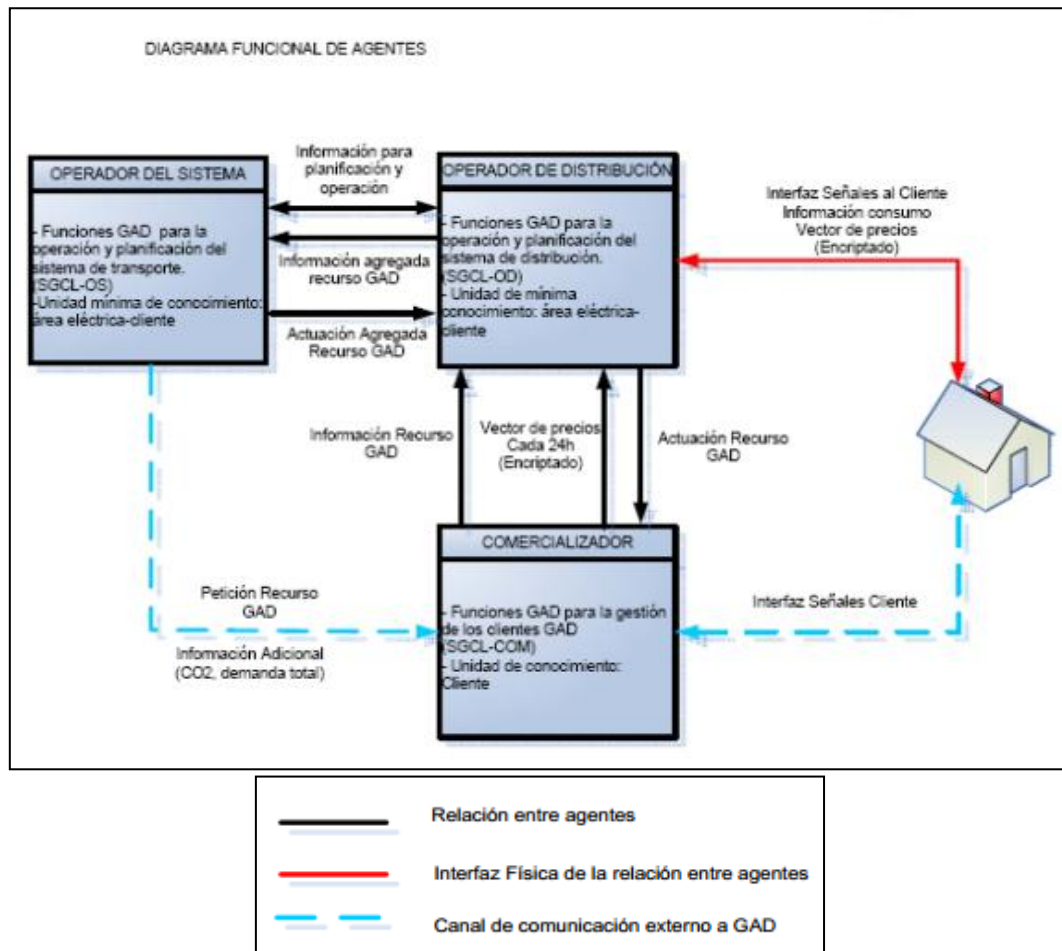


ILUSTRACIÓN 23: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROYECTO GAD. FUENTE: PROYECTO GAD

La comunicación se lleva a cabo mediante dos tipos de señales:

- SEÑALES DE PRECIO EN FORMA DE VECTORES: se hace llegar la información al consumidor con un mínimo de un día de antelación, de manera que sea posible la gestión de las cargas de manera eficiente. También se aplican tarifas, de las cuales hemos hablado anteriormente, como TOU o CPP.
- SEÑALES TÉCNICAS: Señales que avisan de incidencias ocurridas en las redes de transporte o distribución.

5.2 PROYECTO PRICE

Las siglas del Proyecto PRICE corresponden a Proyecto Conjunto de Redes Inteligentes en el Corredor del Henares, en el cual colaboran multitud de empresas del sector, siendo liderado por Iberdrola Distribución y Unión Fenosa.

Este proyecto consta de cuatro ramas diferenciadas, que son [18]:

-[PRICE-RED: SUPERVISIÓN Y AUTOMATIZACIÓN](#): Cuyo objetivo es el diseño y desarrollo de una red inteligente e interoperable a través de la integración de sistemas y equipos en la red de centros de transformación, facilitando así la supervisión y automatización de la red completa de distribución.

-[PRICE-GEN: GESTIÓN ENERGÉTICA](#): Rama centrada en la gestión energética de redes mediante el desarrollo de nuevos equipos de medida inteligente que permitan proporcionar información puntual de los consumos y de la generación tanto de los clientes como de los propios del estado de la red eléctrica.

-[PRICE-GDI: GENERACIÓN DISTRIBUIDA](#): Sistema de monitorización de la generación a nivel de distribución y soluciones basadas en electrónica de potencia que permitan estabilizar la tensión de red y que unidas a muchas unidades de generación distribuida puedan apoyar al resto de la red.

-[PRICE-GDE: GESTIÓN DE LA DEMANDA](#): Esta subproyecto busca desarrollar un sistema de monitorización del consumo de los clientes. Se trata de un sistema basado en protocolos abiertos e interoperables que intenta optimizar el consumo eléctrico, tanto su generación como su consumo y distribución, a través de la implantación de la Gestión Activa de la Demanda (GAD). Utiliza elementos como los contadores inteligente y los Gestores Energéticos domésticos. Este proyecto además es pionero en la implantación del futuro coche eléctrico a la gestión activa de la demanda.

5.3 PROYECTO SMART CITY

Este proyecto, financiado por la eléctrica ENDESA, busca la creación de ciudades inteligentes, donde los vehículos, los edificios, los ciudadanos y demás agentes de una ciudad participan activamente, consiguiendo así ciudades más eficientes a nivel energético y más comprometidas con el medio ambiente. Se trata de un proyecto muy amplio, del cual no podemos hablar en su totalidad pero cabe destacar que utiliza la gestión activa de la demanda (GAD) como mecanismo principal en el ahorro energético. Los pilares de la GAD en el proyecto SMART CITY son muy similares a las características comunes anteriormente mencionadas, estas son [19]:

-SERVICIOS DE INFORMACIÓN Y CONCIENCIACIÓN (INF): Instalación de dispositivos que permitan al cliente conocer de forma inmediata su consumo.

-SERVICIOS DE GESTIÓN ENERGÉTICA (EN): Instalación de dispositivos que permitan al cliente una gestión de sus cargas, utilizando señales de precios, para que el cliente sea capaz de valorar y gestionar manualmente, si así lo desea, las cargas energéticas de su casa buscando el ahorro económico.

-SERVICIOS DE GESTIÓN REMOTA DE CARGAS (DR): Utilización de protocolos de Gestión Activa de la Demanda, previo acuerdo con el cliente, mediante los cuales se podrá actuar de forma remota sobre algunas cargas no crítica, apagándolas y encendiéndolas según sea necesario.

6 MODELADO DE LOS APARATOS

Para que los electrodomésticos puedan ser administrados por el algoritmo scheduling necesitan ser transformados en magnitudes temporales, para ello se necesita un proceso de modelado.

El proceso de modelado consta de dos partes, el primero se trata de un modelado físico de los aparatos. Esto quiere decir que mediante ecuaciones físicas se realiza un modelo simplificado del electrodoméstico.

Una vez tenemos ese modelo simplificado es el momento de pasarlo a magnitudes temporales, es decir, gracias al modelo físico, conocer cuáles son los periodos y duración de los ciclos de apagado y encendido de los electrodomésticos que nos permiten un uso eficiente de éstos mismos.

Este modelo tanto físico como temporal se ha realizado en el departamento de la Università di Pavia donde he colaborado durante la realización de este proyecto y han sido publicados en [20].

6.1 APARATOS UTILIZADOS

En este proyecto se trabajará con cinco aparatos eléctricos diferentes, todos ellos electrodomésticos:

- Horno eléctrico
- Frigorífico
- Lavavajillas
- HVAC (Aire acondicionado con función de frio, calor y ventilación)
- Lavadora

Se han elegido estos cinco electrodomésticos por varias razones, la primera de ellas es por su probabilidad de encontrarlos en un hogar común, se considera que la gran mayoría de los hogares, ya no solo españoles, sino mundiales, si poseen electrodomésticos, poseen estos cinco aparatos. Se trata también de cinco aparatos con características diferentes respecto a su utilización, como explicaremos posteriormente, por lo que sirven para demostrar que nuestro modelo es válido en diferentes escenarios.

Tasa de equipamiento en hogares españoles			
Aparato	%	Aparato	%
Frigorífico	99,6%	Horno	77,1%
Congelador	23,2%	Microondas	90,0%
Lavadora	92,9%	Ordenador fijo	52,3%
Lavavajillas	53,1%	Ordenador portátil	40,7%
Televisión	99,9%	Aire Acondicionado	48,9%

ILUSTRACIÓN 24: ANÁLISIS DE LA TASA DE EQUIPAMIENTO EN HOGARES ESPAÑOLES.
FUENTE: ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL EN
ESPAÑA.IDAE

El otro factor que se ha tenido en cuenta es su controlabilidad, se trata de aparatos que pueden ser controlados de manera centralizada y poseen la capacidad de ser apagados o encendidos sin afectar, prácticamente, al confort del usuario.

Es por esto que electrodomésticos como pueden ser la televisión, aparatos de sonido o sistemas de iluminación no se han tenido en cuenta, ya que se sobreentiende que son aparatos que de ser encendidos es porque demandan un uso en el mismo momento. Por ejemplo, si el usuario enciende su televisor, no podemos hacer que el sistema de Gestión Activa de la Demanda lo apague, ya que el cliente quiere disfrutar de su electrodoméstico en ese mismo instante; lo que es labor de este proyecto es intentar que en ese momento en el que el usuario utiliza su televisor, podamos regular el uso de otros electrodomésticos como el horno o el frigorífico, evitando así picos de demanda sin disturbar el confort del cliente.

Una vez elegidos los electrodomésticos a usar, se debe realizar el paso desde sus magnitudes físicas (termodinámicas) a variables temporales, para poder así utilizar los sistemas en tiempo real, pero antes de eso debemos catalogar los electrodomésticos o aparatos eléctricos en dos clases diferenciadas.

Realizaremos una clasificación, como ya hicimos anteriormente en los tipos de algoritmos, en función de si las tareas (en este caso aparatos eléctricos) se accionan, bien sea a través de señales de tiempo (TT, time-triggered) o por señales de evento (ET, event-triggered).

6.1.1 APARATOS TT (TIME-TRIGGERED)

Los aparatos TT se activan por tiempo, es decir, no es el usuario quien los acciona, cada aparato tiene unos periodos de activación. Se trata de los aparatos más sencillos de controlar ya que al ser periódicos son los idóneos para el tipo de algoritmo que vamos a usar. Como todos los aparatos que utilizaremos, permiten que sus funciones sean interrumpidas según la necesidad del sistema.

En este caso, los electrodomésticos que hemos elegido y que se consideran TT son los sistemas HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) y el frigorífico.

6.1.2 APARATOS ET (EVENT-TRIGGERED)

En el otro lado tenemos los aparatos accionados por evento, estos aparatos actúan cuando el usuario los acciona.

Estos eventos son aperiódicos, lo que dificulta su planificación, aunque se pueden planificar o *schedulizar* gracias a que no se trata de tareas críticas.

Hemos comentado anteriormente como no hemos elegido aparatos accionados por el usuario como la televisión ya que perjudicaría el confort, en cambio en estos electrodomésticos no existe la necesidad de comenzar la tarea de manera inmediata a su encendido ya que no suele conllevar una necesidad súbita. Esta característica es la clave que permite que estas tareas se puedan planificar. Por ejemplo, el encendido de una lavadora no implica que se ponga en funcionamiento, con la planificación podemos buscar el momento óptimo de puesta en marcha, dentro de unos límites establecidos por el usuario. Estos aparatos serán el horno, la lavadora y el lavavajillas.

6.2 MODELADO FÍSICO DE LOS APARATOS

Una vez elegido el algoritmo y los aparatos eléctricos a utilizar debemos pasar al modelado físico de éstos.

El modelado físico que se expone a continuación se ha realizado siguiendo las pautas encontradas en [20].

Debemos diferenciar el modelado de los aparatos TT y ET, pero antes de eso existe una función que es común para ambos.

Para todas las cargas, existe una función de activación que llamaremos $s_i(t)$ tal que:

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{cuando el aparato no está accionada} \\ 1, & \text{cuando el aparato está accionado} \end{cases} \quad (1)$$

Cuando el aparato, es decir, su correspondiente carga eléctrica está activa, genera una demanda eléctrica a la que llamaremos P_i , en caso contrario, no existirá demanda eléctrica.

6.2.1 MODELADO FÍSICO DE APARATOS TT (TIME-TRIGGERED)

El estado de un aparato de tipo TT se controla por una variable de estado que llamaremos $X_i(t)$, en estos casos, como tanto el HVAC como el frigorífico, son elementos con características térmicas, la variable de estado representará su temperatura interna, la cual se deberá mantener en unos límites que establecerán su rango de operación, los cuales pueden ser definidos tanto por el usuario como por el fabricante de dichos electrodomésticos. El rango de operación lo definiremos como:

$$[\overline{X}_i - \Delta_i, \overline{X}_i + \Delta_i]$$

Donde el comportamiento de la variable de estado se describe como un sistema dinámico modelado por un proceso físico, quedando la ecuación como:

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = f_{si(t)} = \begin{cases} -\alpha_i^{on}, & \text{si } s_i(t) = 1 \\ +\alpha_i^{off}, & \text{si } s_i(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Siendo las variables $\alpha_i^{on} > 0$ y $\alpha_i^{off} > 0$ valores de pendiente, tanto en positivo como en negativo. El hecho de que se haya elegido una pendiente negativa cuando el aparato se acciona se debe a la elección, en este caso, de aparatos cuyo objetivo es la reducción de temperatura, en caso de querer utilizarlo para aparatos cuyo objetivo sea el de subir la temperatura, simplemente utilizaremos la pendiente con su valor positivo.

Todas las cargas que se utilizan en este proyecto se apagan y encienden con señales de tipo on/off, sus perfiles de carga se modelan utilizando su comportamiento dinámico, por lo tanto, para derivar su comportamiento temporal respecto al apagado y encendido, debemos hallar los valores α_i^{on} y α_i^{off} , lo que conseguiremos analizando su modelo termodinámico.

Lo primero que haremos será utilizar la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q$$

Donde $\Delta U = C\Delta T$.

Por lo que $C_i \dot{T}_i = \dot{Q}_i$, siendo \dot{Q}_i la cantidad de calor transmitida por el sistema, donde se contabilizan las pérdidas de calor por radiación, convección y conducción, a lo que añadimos el poder calorífico de la carga (aparato eléctrico) en funcionamiento:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_i^{pérdidas} - P_i \quad (3)$$

A continuación, describiremos los tres tipos diferentes de $\dot{Q}_i^{pérdidas}$ que existen:

- Conducción: $\dot{Q}_{Cond} = \frac{A (T_{ext} - T_{int})}{\sum_{k=1}^n \frac{s_k}{\lambda_k}}$ donde A es el área, λ_k la conductividad térmica y s_k la anchura de la superficie externa.
- Convección: $\dot{Q}_{Conv} = A * h_c * (T_{ext} - T_{int})$ donde A es el área y h_c el coeficiente de convección del calor en el medio.

- Radiación: $\dot{Q}_{Rad} = A * h_r * (T_{ext} - T_{int})$ donde A es el área y $h_r = 4\epsilon\sigma T_{media}^3$ el coeficiente de radiación del calor en el medio.

Una vez definidas las diferentes pérdidas, podemos observar que tanto la radiación como la conducción dependen de las propiedades de la superficie, si sumamos los coeficientes $h = h_c + h_r$, obtenemos el llamado coeficiente laminar, por lo que:

$$\dot{Q}_{laminar} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R_{laminar}} \quad (4)$$

Donde $R_{laminar} = \frac{1}{hA}$

Por lo que si operamos (3) - (4):

$$\dot{Q}_i^{pérdidas} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{laminar} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R_{laminar} + R_{cond}} \quad (5)$$

Siendo $R_{cond} = \frac{A}{\sum_{k=1}^n \frac{s_k}{\lambda_k}}$

Una vez halladas todas estas formulas, podemos averiguar cuáles son las pendientes de nuestras rampas:

- $\alpha_i^{on} = \frac{1}{C_i} \left(P_i - \frac{T_{ext}-T_{int}}{R_{conv}+R_{cond}} \right) \quad (6a)$

- $\alpha_i^{off} = \frac{1}{C_i} \left(\frac{T_{ext}-T_{int}}{R_{conv}+R_{cond}} \right) \quad (6b)$

Donde C_i corresponde a valores de la propia capacidad calorífica del frigorífico o el aire acondicionado, dados tanto por sus materiales, calidad, categoría o incluso la cantidad de alimentos que tenga el frigorífico en cada momento.

Con todos estos datos y conociendo el funcionamiento y características de estos electrodomésticos, podemos realizar un gráfico explicativo donde se vea su comportamiento tanto en términos de temperatura como en gasto energético, los cuales serán claves para el posterior paso a términos temporales del funcionamiento de dichos aparatos:

MODELADO FÍSICO DE UN AIRE ACONDICIONADO

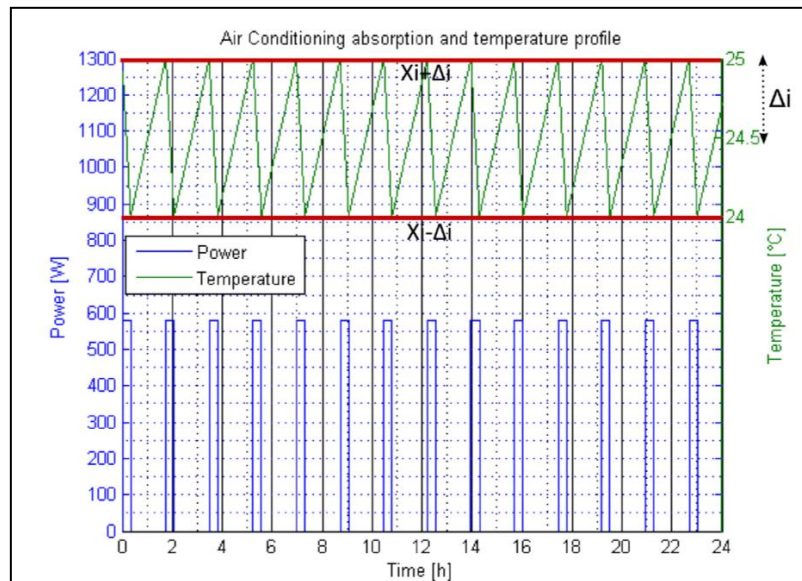


ILUSTRACIÓN 25: MODELADO FÍSICO DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO EN UNA HABITACIÓN DE 26 M² CON UNA TEMPERATURA IMPUESTA DE 24, 5°C±0,5°C. FUENTE: M.L. DELLA VEDOVA, T. FACCHINETTI, REAL-TIME SCHEDULING FOR PEAK LOAD REDUCTION IN A LARGE SET OF HVAC LOADS

MODELADO FÍSICO DE UN FRIGORÍFICO

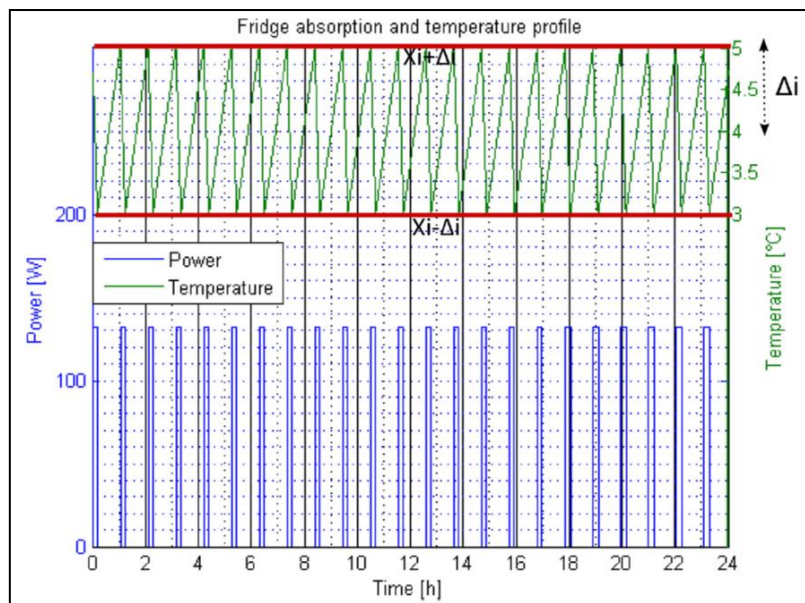


ILUSTRACIÓN 26: MODELADO FÍSICO DE UN FRIGORÍFICO CON UNA TEMPERATURA IMPUESTA DE 4°C±1°C. FUENTE: M.L. DELLA VEDOVA, T. FACCHINETTI, REAL-TIME SCHEDULING FOR PEAK LOAD REDUCTION IN A LARGE SET OF HVAC LOADS

6.2.2 MODELADO FÍSICO DE APARATOS ET (EVENT-TRIGGERED)

Los aparatos accionados por eventos (ET) son completamente diferentes a los accionados periódicamente o TT. Estos aparatos son activados por el usuario por lo que no podemos predecir a ciencia cierta cuándo se pondrán en funcionamiento, aunque si podemos saber cuándo es el periodo del día donde es más probable su accionamiento, como estudiaremos en aparatos posteriores.

En estos aparatos, su comportamiento termodinámico está condicionado por el programa o modo de funcionamiento que elige el usuario, donde cada programa utiliza diferentes temperaturas o tiene diversa duración, por lo que es de suma importancia conocerlos con detalle para saber cual es gasto energético en cada momento de cada modo de funcionamiento.

Como en el apartado anterior, hallaremos los modelos físicos de los tres aparatos utilizados en nuestro proyecto siguiendo las pautas y utilizando los gráficos facilitados en [20].

MODELADO FÍSICO DE UNA LAVADORA

A continuación, realizaremos el modelado físico de una lavadora en su programa más común, hemos considerado un programa de lavado a 40°C con una lavadora de categoría energética tipo A. Si analizamos este modo de lavado en una lavadora común podemos comprobar que tiene varias fases, las cuales son importantes a la hora de realizar su modelado:

- Durante los primeros 800 segundos, se llena el tambor de agua y se realiza una ligera rotación donde se mezcla el detergente con el agua.

- Posteriormente el agua se calienta hasta la temperatura deseada, en este caso hasta los 40°C, gracias a una resistencia térmica en el interior de la lavadora, siendo esta la fase de mayor de mayor demanda energética.
- Una vez alcanzada la temperatura elegida por el usuario, la lavadora comienza a rotar a un mayor número de revoluciones, procediendo con el lavado de la ropa.
- Finalmente, entra en la fase de centrifugado, llevando a cabo periodos de altas revoluciones durante pocos segundos.

Teniendo en cuenta estas cuatro fases, aplicando las leyes termodinámicas usadas anteriormente y estableciendo una temperatura exterior de 20°C y 40°C en el interior de la lavadora, podemos hallar el siguiente modelo físico:

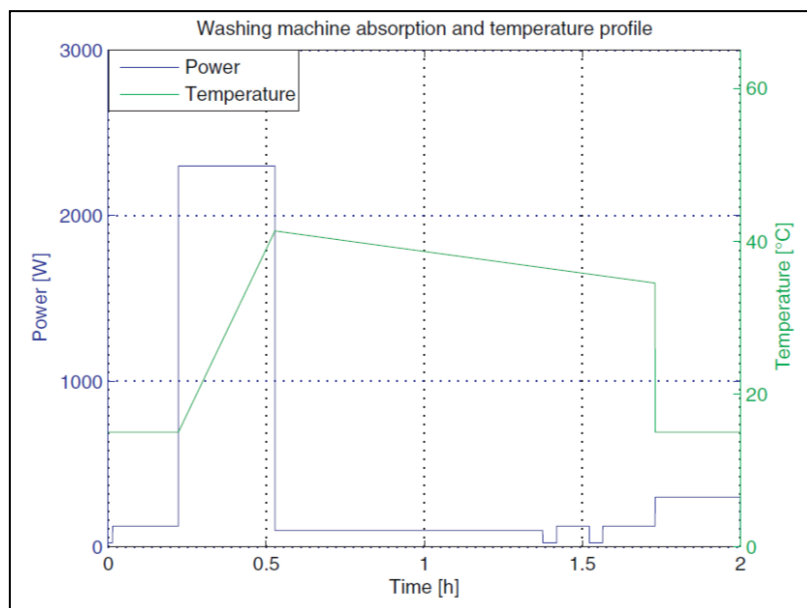


ILUSTRACIÓN 27: MODELADO FÍSICO DE UNA LAVADORA A 40°C, CON UN PICO DE DEMANDA DE 2300W FUENTE: M.L. DELLA VEDOVA, T. FACCHINETTI, REAL-TIME SCHEDULING FOR PEAK LOAD REDUCTION IN A LARGE SET OF HVAC LOADS

MODELADO FÍSICO DE UN LAVAVAJILLAS

Procedemos ahora al modelado físico de un lavavajillas, consideramos esta vez un aparato con categoría energética tipo A, con su modo de funcionamiento más común, en este caso un programa donde se eleva la temperatura del agua a $62,5^{\circ}\text{C}$ en dos ciclos diferenciadas, la primera utilizada para el lavado de los platos y la segunda, al final de periodo total, para el proceso de abrillantamiento, es importante tener en cuenta estos dos ciclos, ya que durante ellos se alcanza un pico de demanda de unos 2200W , por lo que no tenerlos en cuenta podría generar sobretensiones en el sistema, ya que el accionamiento de una tarea periódica de manera simultánea en cualquiera de estos dos ciclos provocaría seguramente un pico de demanda en el hogar, incluso una sobrecarga en la línea.

Por lo tanto, considerando estas fases diferencias y aplicando las leyes termodinámicas, situando la temperatura exterior en 20°C y la temperatura interior en el lavavajillas de $62,5^{\circ}\text{C}$ obtenemos el siguiente modelo físico:

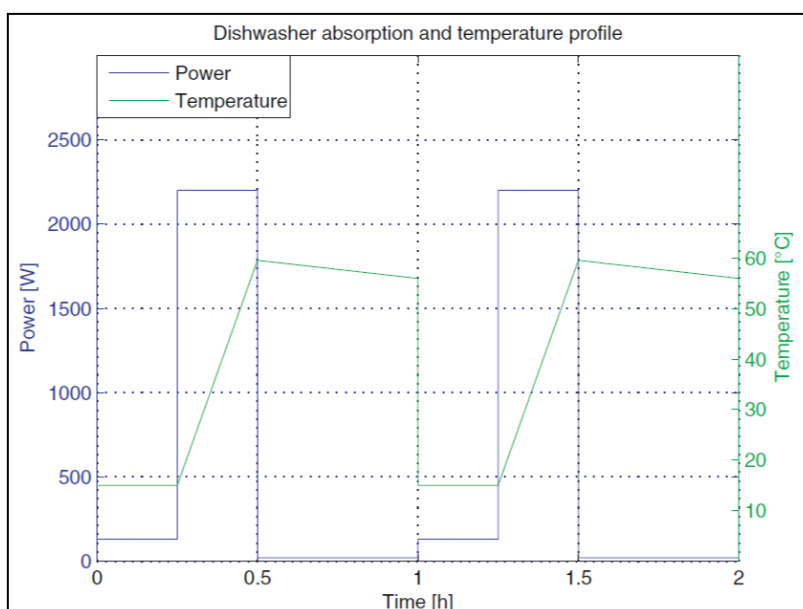


ILUSTRACIÓN 28: MODELADO FÍSICO DE UNA LAVAVAJILLAS, CON UN PICO DE DEMANDA DE 2200W FUENTE: M.L. DELLA VEDOVA, T. FACCHINETTI, REAL-TIME SCHEDULING FOR PEAK LOAD REDUCTION IN A LARGE SET OF HVAC LOADS

MODELADO FÍSICO DE UN HORNO ELÉCTRICO

El horno eléctrico es quizá el modelado más complicado, ya que existen multitud de hornos, con diferentes capacidades, estructuras, materiales, aislamientos, etc.

También si aplicamos la termodinámica se puede comprobar que el consumo energético varía en función de la cantidad de alimentos a cocinar.

Considerando estos elementos, hemos realizado el modelado físico de un horno estándar, cocinando durante una hora, un kilo y medio de alimentos, en un rango de 170°C-180°C, el cual se encarga de mantener el propio horno.

En cuanto al funcionamiento físico-térmico, el horno utiliza la energía eléctrica desde el comienzo del proceso hasta alcanzar la temperatura deseada, posteriormente realiza una serie apagados y encendidos del sistema de calentamiento, con el fin de mantener dentro de un rango, la temperatura deseada. Tanto el ciclo inicial, como estos cortos ciclos de mantenimiento de la temperatura tienen un gasto energético cercano a los 2200W, como podemos observar a continuación:

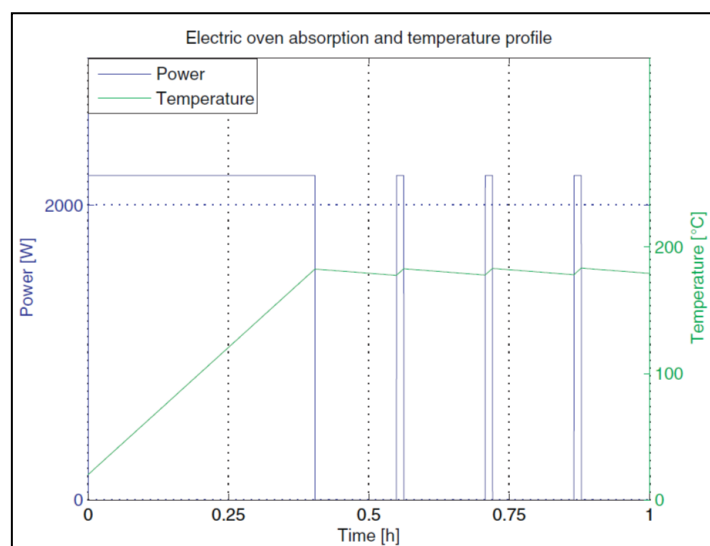


ILUSTRACIÓN 29: MODELADO FÍSICO DE UNA HORNO ELÉCTRICO CON UNA TEMPERATURA DE USO DE 180°C, CON UN PICO DE DEMANDA DE 2200W FUENTE: M.L. DELLA VEDOVA, T. FACCHINETTI, REAL-TIME SCHEDULING FOR PEAK LOAD REDUCTION IN A LARGE SET OF HVAC LOADS

6.3 MODELADO TEMPORAL DE LOS APARATOS

Una vez desarrollados los modelos físicos de los aparatos eléctricos a utilizar, es hora de pasarlos a modelos temporales para que puedan ser ejecutados y ordenados por el *scheduler*, el encargado de aplicar los algoritmos de planificación o *scheduling*.

El *scheduler* utiliza la función (1):

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{cuando el aparato no está accionada} \\ 1, & \text{cuando el aparato está accionado} \end{cases} \quad (1)$$

Y busca alcanzar una planificación o *scheduling* que minimice la expresión total de carga, $w(t)$, que representa el pico máximo de la demanda, en la que consideramos P_i como la cantidad de energía que demanda cada aparato por unidad de tiempo:

$$w(t) = \sum_{i=1}^n P_i s_i(t) \quad (7)$$

6.3.2 MODELADO TEMPORAL DE APARATOS TT (TIME-TRIGGERED)

En el modelado temporal de los aparatos con cargas eléctricas en TT, existen tres factores básicos, que son:

- T_i , periodo en el que se acciona la carga.
- $D_i \leq T_i$ siendo el deadline relativo de la carga.
- $C_i \leq D_i$ tiempo de acción de la carga en cada periodo.

Para este modelado temporal [20], se debe tener en cuenta que la planificación de cargas tipo TT consta de varias secuencias de solicitud de activación.

Estas secuencias se representan como $\mathbf{r}_{i,k} = kT_i$ y se hacen llamar tiempo de solicitud. Una vez recibida esta solicitud, el scheduler o procesador debe accionar la carga eléctrica C_i dentro de unas restricciones temporales de $[\mathbf{r}_{i,k}, \mathbf{d}_{i,k}]$, siendo $\mathbf{d}_{i,k} = \mathbf{r}_{i,k} + D_i$, lo que llamaremos desde ahora como deadline absoluto o último instante para realizar la tarea solicitada de orden k .

Esta definición es la que permite la interrumpibilidad de las cargas, ya que para la realización de las tareas existen restricciones temporales, las cuales en su mayoría permiten que la tarea no tenga la necesidad de ser activa nada más recibir la orden, sino que puede esperar y realizarse en otro momento dentro de sus límites en el caso de que exista otra tarea con mayor prioridad.

Por otra parte, debemos tener en cuenta en este tipo de cargas el factor de utilización:

$$U_i = \frac{C_i}{T_i} \text{ siendo } U_{total} = \sum_{i=1}^n U_i \quad (8)$$

Si unimos estas ecuaciones con la ecuación (2) hallada anteriormente obtenemos que:

$$\begin{cases} T_i = \Delta_i \frac{\alpha_i^{on} + \alpha_i^{off}}{\alpha_i^{on} \alpha_i^{off}} \\ C_i = \frac{\Delta_i}{\alpha_i^{on}} \end{cases} \quad (9)$$

Estos parámetros temporales, garantizan que la variable de estado utilizada para el modelado permanece dentro de sus límites, comportándose así para cada Schedule o planificación válida, sin importar demoras o interrupciones [21].

Dado que en multitud de ocasiones los modelos físicos están muy simplificados, existen pequeños errores de cálculo o incluso ruidos a la hora de medir comportamientos físicos del aparato, en [21] se invita a utilizar una pequeña variación de la ecuación (9), en la cual es necesario medir la variable de estado, $\hat{X}_i(t)$, por ejemplo la temperatura, para corregir el valor del factor C_i , siendo:

$$C_{i,k} = \frac{\Delta_i}{\alpha_i^{on}} + \frac{\hat{X}_i(t) - \bar{X}_i}{\alpha_i^{on} + \alpha_i^{off}} \quad (10)$$

6.3.2 MODELADO TEMPORAL DE APARATOS ET (EVENT-TRIGGERED)

Respecto al modelado temporal de los aparatos con cargas eléctricas en ET, los factores a tener en cuenta son:

- r_i , tiempo de solicitud de activación de la carga, cuando el usuario acciona el aparato.
- D_i siendo el deadline relativo de la carga, una carga activada en r_i , debe completarse antes de su deadline absoluto d_i . $d_i = D_i + r_i$.
- $C_i \leq D_i$ duración máxima del tiempo de activación.

El usuario cuando selecciona un modo de funcionamiento, manda la información al *scheduler*, el cual calcula la duración de dicho modo. El usuario podría elegir también el deadline absoluto del aparato, es decir, como hemos comentado normalmente, este tipo de aparatos suelen carecer de prioridad, en la gran mayoría de los casos el usuario no necesita que la lavadora o el lavavajillas terminen sus tareas de manera inmediata.

Por esta razón es por lo que se plantea la opción de dar a elegir al consumidor una hora límite, que tomaría el valor de deadline absoluto, siendo el *scheduler* el que elija cual es el momento optimo para realizar la tarea.

Es este tipo de uso el que nos permite utilizar los aparatos ET de la misma manera que los aparatos TT en el régimen temporal, ya que podemos considerar que el periodo de las tareas ET es igual a su deadline relativo, lo que hace posible el uso de los algoritmos *scheduling* de una manera mucho más simple de la que conllevaría la activación inmediata de estos electrodomésticos.

Por todo ello, los aparatos ET tienen un factor de utilización igual que el de los aparatos TT salvo por la utilización del D_i en lugar de T_i :

$$U_i = \frac{C_i}{D_i} \text{ siendo } U_{total} = \sum_{i=1}^n U_i \quad (11)$$

7 PRUEBA EXPERIMENTAL

La intención de este proyecto, como ya hemos comentado con anterioridad, es extraer de sus usos más comunes a los algoritmos tipo *scheduling* y utilizarlos en el control de aparatos domésticos, para controlar así las cargas que éstos exigen, en búsqueda de la eficiencia energética en el hogar mediante una gestión activa de la demanda.

El uso de los algoritmos *scheduling* es el adecuado para estos casos, ya que están diseñados para funcionar de manera óptima en el supuesto peor caso, a su vez, al ser algoritmos relativamente sencillos, permite controlar de manera rápida y eficiente varias tareas, en este caso aparatos eléctricos, de manera simultánea.

Todo esto, unido a la posibilidad en un futuro de extender este uso energético de los algoritmos *scheduling* a escenarios mayores como grandes edificios o fábricas, hace de esto un asunto muy interesante y que dará que hablar en poco tiempo.

7.1 CÁLCULOS PREVIOS

7.1.1 OBTENCIÓN DE LOS VALORES NUMÉRICOS DEL MODELADO TEMPORAL

Llegados a este punto, una vez realizado todo el proceso de modelado, tanto físico como temporal de cada electrodoméstico, podemos obtener los valores temporales numéricos finales. Utilizaremos los datos obtenidos de [20].

CARGAS TT

En los aparatos de tipo TT, tenemos que sustituir los datos obtenidos anteriormente en la ecuación (9) hallada anteriormente:

$$\begin{cases} T_i = \Delta_i \frac{\alpha_i^{on} + \alpha_i^{off}}{\alpha_i^{on} \alpha_i^{off}} \\ C_i = \frac{\Delta_i}{\alpha_i^{on}} \end{cases} \quad (9)$$

Siendo los valores de las pendientes los siguientes, para los dos aparatos de tipo TT:

- HVAC: $\begin{cases} \alpha_i^{on} = -2,97^\circ\text{C}/h \\ \alpha_i^{off} = -0,71^\circ\text{C}/h \end{cases}$
- Frigorífico: $\begin{cases} \alpha_i^{on} = -10,357^\circ\text{C}/h \\ \alpha_i^{off} = -2,333^\circ\text{C}/h \end{cases}$

CARGAS ET

Para las cargas ET el cálculo es diverso, debemos realizar un cálculo manual para determinar el valor de los parámetros en tiempo real. Todas las suposiciones que haremos a continuación se basan en los patrones temporales racionales, tanto respecto a los periodos de uso como a los deadlines, intentando ser lo más fieles a la realidad posible.

En el caso de la lavadora, tenemos un tiempo de uso de 2 horas y un deadline relativo de 6 horas, por lo que si aplicamos la ecuación (11):

$$U_{lavadora} = \frac{C_i}{D_i} = \frac{2}{6} = 0,33$$

Usaremos para el lavavajillas unos factores iguales siendo:

$$U_{lavavajillas} = \frac{C_i}{D_i} = \frac{2}{6} = 0,33$$

En cuanto al horno, su funcionamiento es diferente ya que su deadline relativo debe ser muy parecido a su tiempo de ejecución, debido a que cuando se acciona el horno, en la mayoría de los casos es para su uso prácticamente inmediato. Por esta razón utilizaremos un tiempo de uso de 1 hora y un deadline relativo de 75 minutos, siendo por tanto su utilización de:

$$U_{lavadora} = \frac{C_i}{D_i} = \frac{60}{75} = 0,8$$

RESULTADOS NUMÉRICOS

A continuación se presenta la tabla con los valores temporales de las cargas de los cinco electrodomésticos:

Carga	T[s]	C[s]	D[s]	U
Frigorífico	1890,4	347,6	D=T	0,184
HVAC	3140,2	605,6	D=T	0,193
Lavadora	-	7200	21600	0,333
Lavavajillas	-	7200	21600	0,333
Horno	-	3600	4500	0,8

ILUSTRACIÓN 30: RESULTADOS NUMÉRICOS DE LOS VALORES TEMPORALES DE LOS
CINCO ELECTRODOMÉSTICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

7.1.2 PARTICIÓN DE LAS CARGAS

En escenarios reales, cabe la posibilidad de que exista un gran número de tareas (aparatos) que pueden utilizarse de manera simultánea o puede ocurrir a su vez que a pesar de que haya un menor número de cargas, éstas precisen un gran tiempo de utilización.

Esto provoca errores en la planificación, haciendo imposible la acción de los algoritmos. Estos errores se pueden detectar utilizando el “schedulability test”, que ya hemos definido con anterioridad.

Como solución a este problema aplicaremos una partición de las cargas [22]. Este método divide las cargas en conjuntos de tareas, haciendo que dichos conjuntos sean planificables de manera individual.

La organización y creación de los conjuntos se basa en los parámetros temporales derivados de los modelos físicos y del consumo energético de cada carga, organizándose las cargas de mayor a menor consumo energético.

Esta modo de organización se basa en el algoritmo First-Fit Decreasing Height (FFDH) [23], en el cual se van seleccionando las cargas con mayor consumo hasta el momento en el que deja de ser *schedulable*, en ese momento se crea otro grupo, asegurando así que cada grupo cumple satisfactoriamente el “schedulability test”, de manera que la utilización total del sistema planificador es $U_{tot} \leq 100\%$, de modo que el algoritmo EDF sea implementado satisfactoriamente en cada conjunto de cargas.

El algoritmo FFDH tiende a crear el menor número de conjuntos de cargas y a su vez tiende a organizar las cargas de mayor consumo en un mismo grupo, evitando así su activación simultánea, lo que genera una gran reducción en los picos de carga energética.

En este proyecto se nos presenta un escenario con cinco tareas diferentes, cada una con diferentes parámetros temporales. Una vez llegado este punto es el momento de aplicar el algoritmo que hemos seleccionado, el EDF, pero antes de aplicarlo debemos realizar el “schedulability test”, el cual debe ser positivo para poder aplicar el algoritmo.

Utilizaremos los datos que hemos hallado a largo del proceso y presentados en la ilustración 30.

Como ya sabemos, el test es el siguiente:

$$U_{total} = \sum_{i=1}^n U_i = 0,184 + 0,193 + 0,33 + 0,33 + 0,8 = 1,843 > 1$$

Como se puede observar, el “schedulability test” ha fallado por lo que no podemos aplicar el algoritmo EDF, la solución que aplicaremos es la partición de cargas, realizaremos conjuntos de cargas, siendo cada conjunto schedulizable individualmente, para ello aplicaremos el algoritmo FFDH, separando de mayor a menor carga el conjunto de tareas, formando grupos:

Grupo	Cargas	P [W]	U	U _{Total}	P _{max}
G1	Lavadora	2300	0,33	0,86	2300
	Lavavajillas	2200	0,33		
	HVAC	580	0,19		
G2	Horno	2200	0,8	0,98	2200
	Frigorífico	132	0,18		

ILUSTRACIÓN 31: IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO FFDH, CREACIÓN DE LOS GRUPOS A PLANIFICAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como podemos observar, hemos conseguido separar las cargas en dos conjuntos *schedulables* ó planificables individualmente, donde podemos aplicar el algoritmo EDF. A su vez, hemos evitado que dos de las tres cargas que más consumen, la lavadora y el lavavajillas, no puedan activarse simultáneamente, evitando así picos de demanda energética. A continuación se representa gráficamente la aplicación del algoritmo FFDH:

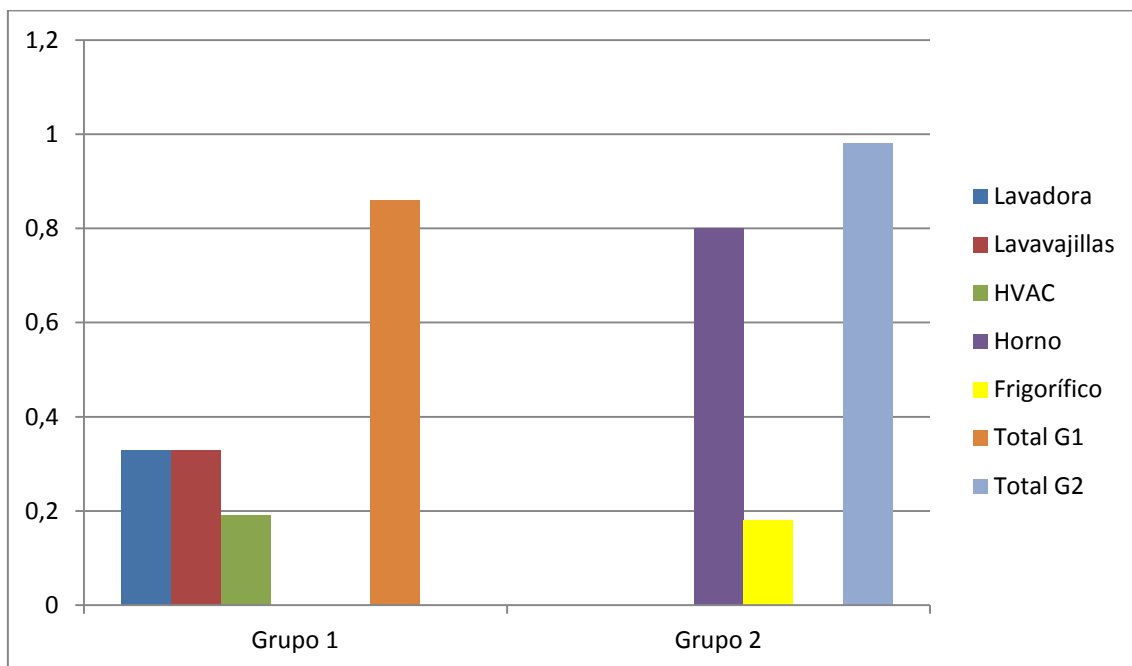


ILUSTRACIÓN 32: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO FFDH. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con esta partición nos aseguramos un descenso del pico máximo alcanzable por la casa, debido a que dentro de un mismo grupo no pueden accionarse dos aparatos a la vez, por lo que el momento de máxima carga sería:

$$P_{max} = P_{max G1} + P_{max G2}$$

Mientras que sin la partición en grupos, un momento de máxima carga sería el accionamiento simultaneo de todos los aparatos:

$$P_{max} = 2300 + 2200 + 580 + 2200 + 132 = 7412 \text{ W}$$

Utilizando la partición, la carga máxima sería:

$$P_{max} = P_{max G1} + P_{max G2} = 2300 + 2200 = 4500 \text{ W}$$

Es decir, el uso de la partición en este escenario de cargas nos asegura, en el peor de los casos posibles, un descenso del pico de demanda al 40%, exactamente 2912 W, como veremos en la sección de resultados.

7.1.3 CREACIÓN DEL PATRÓN DE USO TEMPORAL

Como ya sabemos, los aparatos TT, en este caso el HVAC y el frigorífico, se activan periódicamente, el valor de estos periodos se ha hallado en los aparatados anteriores. En las tareas ET, el horno, el lavavajillas y la lavadora, conocemos la duración que tendrá su uso pero se desconoce el momento en el que se va a accionar cada aparato.

Gracias a la recogida de datos existentes en internet se puede obtener la información necesaria para conocer el momento del día donde es más probable su accionamiento.

El conocer estos datos temporales nos permite realizar simulaciones basadas en escenarios domésticos factibles, gracias a los cuales obtenemos unos datos que serán similares a los que adquiriremos una vez este proyecto se implemente en hogares reales.

La obtención del patrón diario más probable en la utilización de los electrodomésticos ET se ha realizado en base a los datos disponibles en el “Estudio sobre Consumo Energético del Sector Residencial en España” [5]:

- Patrón de uso diario de una lavadora:

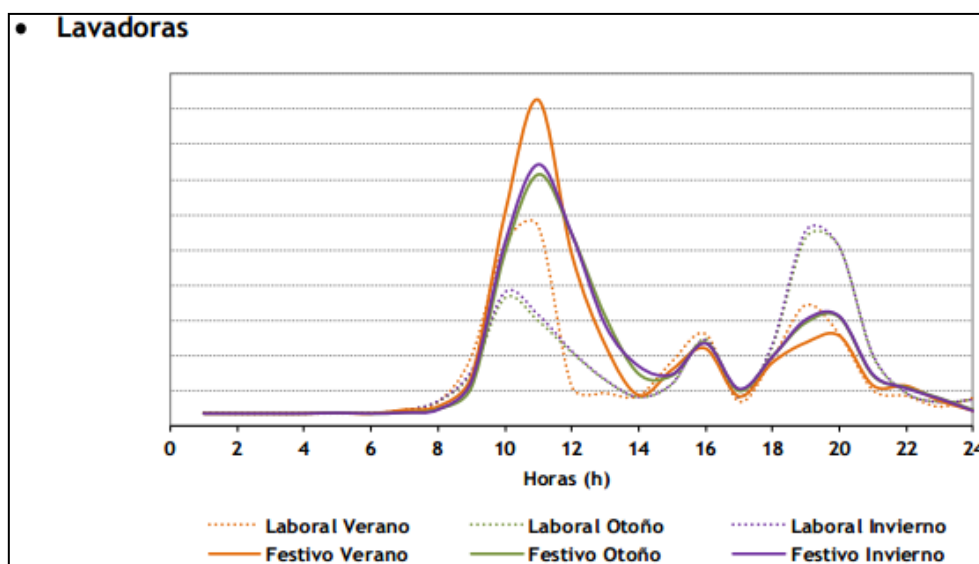


ILUSTRACIÓN 33: PATRÓN DE USO TEMPORAL DE LA LAVADORA EN HOGARES ESPAÑOLES. FUENTE: ESTUDIO SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL EN ESPAÑA. IDAE

- Patrón de uso diario de un lavavajillas:

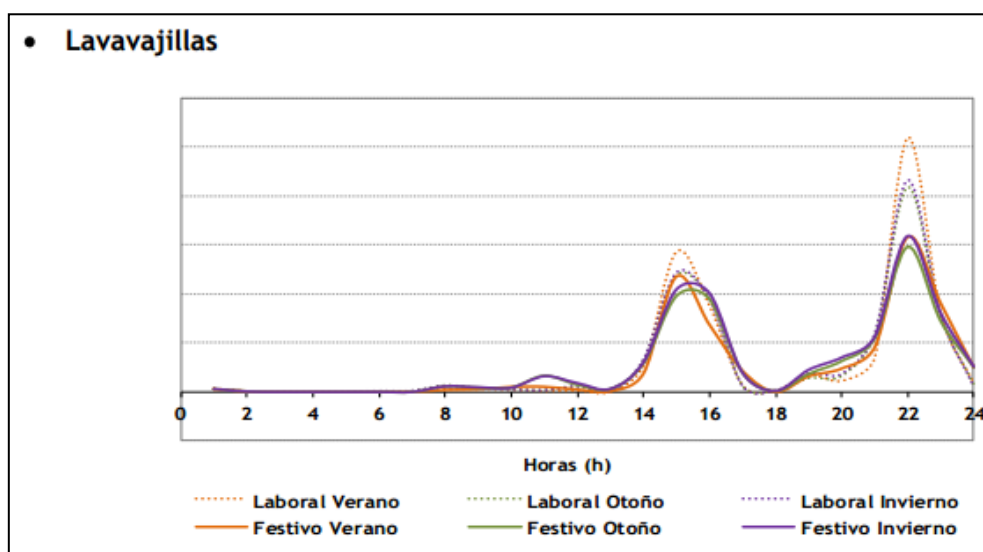


ILUSTRACIÓN 34: PATRÓN DE USO TEMPORAL DEL LAVAVAJILLAS EN HOGARES ESPAÑOLES. FUENTE: ESTUDIO SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL EN ESPAÑA.IDAE

Respecto al patrón de uso del horno eléctrico no se han publicado datos oficiales, pero se calculará de la siguiente manera, dado que el horno eléctrico modelado tiene un tiempo de uso de una hora se ha supuesto su activación alrededor de una hora y media antes de la hora más común de la cena en España, por lo que se ha supuesto un periodo de máxima activación alrededor de las 8 de la tarde.

Como podemos observar en las gráficas temporales, las horas de activación más frecuente en el caso de la lavadora son las 11 de la mañana, seguido de cerca por las 7 de la tarde y en el caso del lavavajillas las 10 de la noche y las 4 de la tarde.

En este informe, debido a que ha sido elaborado en colaboración con una universidad italiana, se han realizado las simulaciones siguiendo el patrón de uso habitual de ese país. Dadas las diferencias culturales se puede apreciar un desfase horario en los periodos de máxima probabilidad de utilización de aproximadamente una o dos horas. En la siguiente tabla se mostrará el momento del día en el cual es más probable el accionamiento del aparato ET y el momento en el cual la ejecución corresponde al peor caso posible, que no es otro que el accionamiento simultáneo de los aparatos.

Aparato	Potencia [W]	Momento probable (ES)	Momento probable (IT)	Peor caso (ES)	Peor caso (IT)
Lavadora	2300	11:00	10:00	19:00	18:00
Lavavajillas	2200	22:00	20:00	19:00	18:00
Horno	2200	20:00	18:00	19:00	18:00

ILUSTRACIÓN 35: RESUMEN DEL PATRÓN DE USO TEMPORAL DE LOS ELECTRODOMÉSTICOS EN ESPAÑA E ITALIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Siguiendo esta tabla podemos observar que tanto en el típico hogar español como en el italiano, las tareas ET en el momento más probable no se solaparían entre ellas, aunque es bastante probable que se solapen con alguna tarea TT, momento en el cual el algoritmo planificador entraría en acción, evitando en la medida de lo posible este suceso.

En el peor de los casos, tanto en el hogar español como en el italiano, podría llegar a ocurrir un accionamiento simultaneo de los tres aparatos ET, a lo que se podría añadir a su vez algún aparato de tipo TT, cuyo periodo coincida con el momento crítico, este suceso provocaría un enorme pico de demanda, que perjudica tanto al consumidor como al sistema eléctrico- energético.

7.2 EXPERIMENTO

Llegados a este punto, conociendo todos los valores temporales de los cinco aparatos y el momento de uso en los dos escenarios a estudiar, el caso más probable y el peor de los casos, podemos simular de manera manual cual sería la demanda energética en el hogar a lo largo del día, creando así un perfil de activación temporal y energético en los dos escenarios, que posteriormente modificaremos con el uso del algoritmo.

Estos perfiles de activación temporal han sido creados manualmente y obtenidos de [20].

7.2.1 CASO MÁS PROBABLE DE UTILIZACIÓN

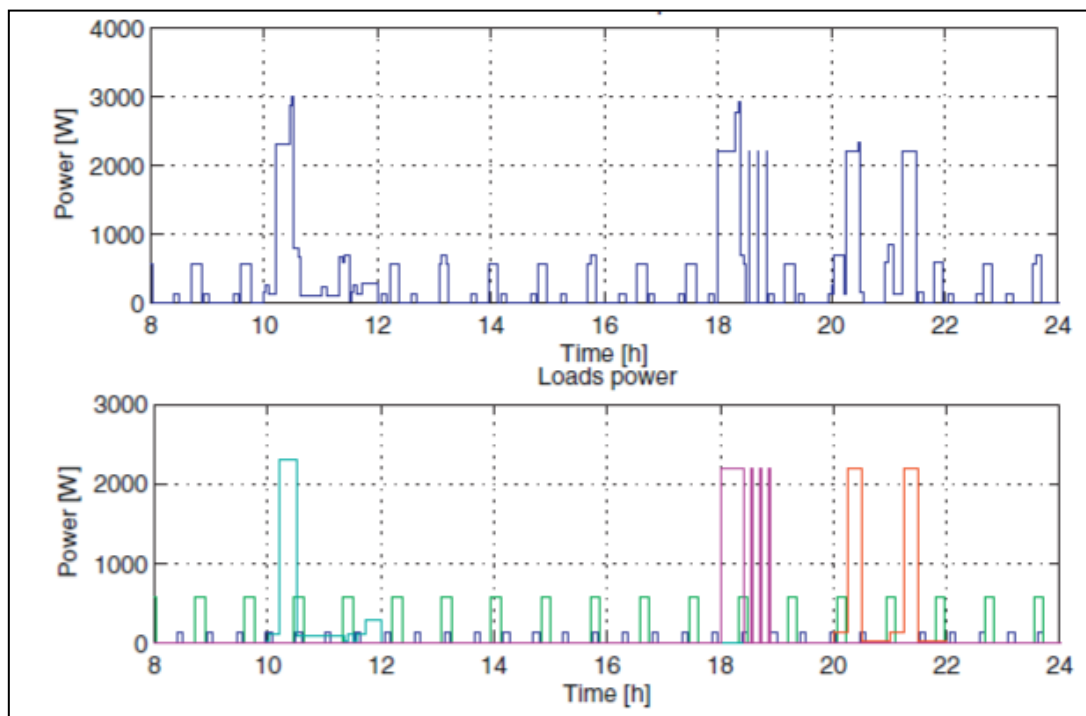


ILUSTRACIÓN 36: PERFIL DE ACTIVACIÓN TEMPORAL Y ENERGÉTICO EN EL CASO MÁS PROBABLE DE UTILIZACIÓN. FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES

Siendo verde la lavadora, morado el horno y naranja el lavavajillas.

Podemos observar como no coinciden ninguno de los aparatos ET, pero que se activan de manera simultánea con alguno de los ciclos de los aparatos TT.

Se aprecian dos picos cercanos a los 3000 W producidos por el uso simultaneo de la lavadora y los dos aparatos TT sobre las 10 de la mañana y otro pico sobre las 6 de la tarde producido por el horno y los dos aparatos TT.

7.2.2 PEOR CASO DE UTILIZACIÓN

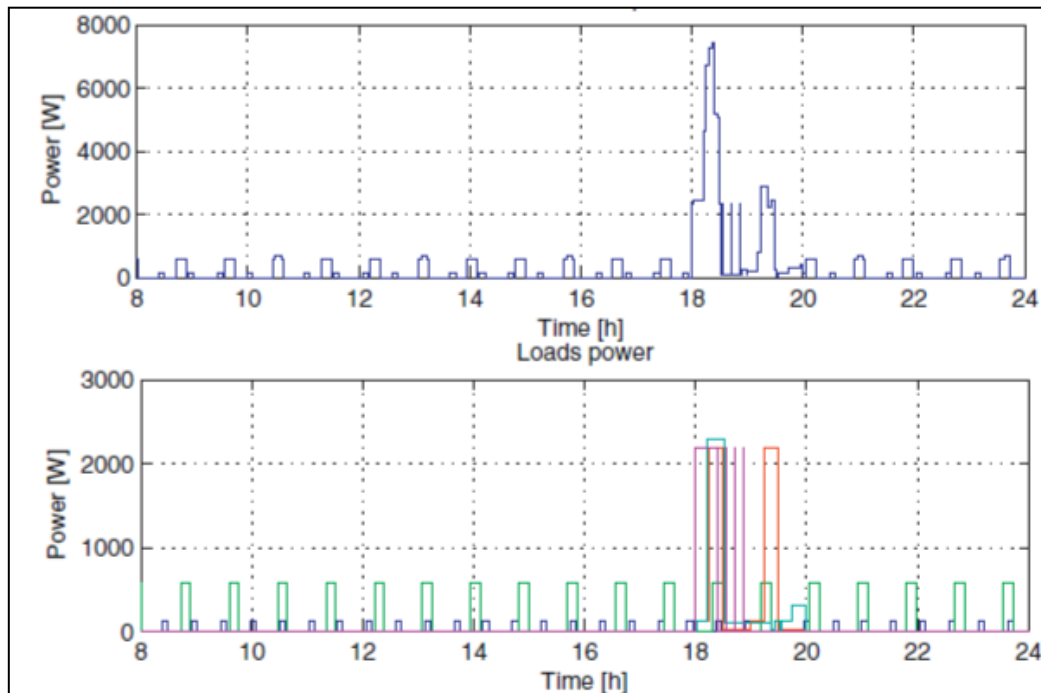


ILUSTRACIÓN 37: PERFIL DE ACTIVACIÓN TEMPORAL Y ENERGÉTICO EN EL PEOR CASO DE UTILIZACIÓN. FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES

Siendo verde la lavadora, morado el horno y naranja el lavavajillas.

Podemos observar una gran acumulación de procesos que se accionan en el periodo desde las 18:00 hasta las 20:00. Se accionan simultáneamente todos los aparatos ET, la lavadora, el horno y un ciclo del lavavajillas.

A esta solapación de las activaciones de los aparatos ET se le suma la activación de los dos aparatos TT, provocando así un gran pico de consumo superior a los 7000 W.

7.3 RESULTADOS

Presentados ya los perfiles de activación y uso de los cinco aparatos a lo largo de un día, es hora de simular de manera manual que ahorro en el pico de la demanda energética provocaría el uso del algoritmo scheduling.

Como se ha presentado anteriormente, existen dos escenarios diferentes donde la acción de esta solución es diversa, el patrón de uso más probable y el peor momento de ejecución.

Las diferencias del uso de la gestión activa de la demanda en estos dos escenarios es significativa, siendo extremadamente útil especialmente en el segundo de los casos, como veremos a continuación.

Cabe resaltar que los siguientes resultados han sido publicados en [20], siendo mi labor la asimilación de los conceptos utilizados, la supervisión de los cálculos y su corrección para los futuros proyectos dentro del departamento encargado de la investigación.

7.3.1 RESULTADOS EN EL CASO MÁS PROBABLE DE USO

En este ejemplo, se observa el escenario de uso más común en un hogar convencional. Como se ha explicado anteriormente se ha dividido en dos grupos los cinco aparatos a organizar, siendo:

- En el grupo 1:
 - Azul: Aire acondicionado (HVAC), accionamiento periódico.
 - Amarillo: Lavadora, accionada de 10:00 a 12:00
 - Verde: Lavavajillas, accionado de 20:00 a 22:00
- En el grupo 2:
 - Rojo: Frigorífico, accionamiento periódico.
 - Cyan: Horno, accionado de 18:00 a 19:00

El siguiente esquema se representa el patrón de uso temporal y el gasto energético, sin la utilización del algoritmo *scheduling*, a diferencia de la ilustración 38, se representa en la parte superior los momentos de activación de cada aparato:

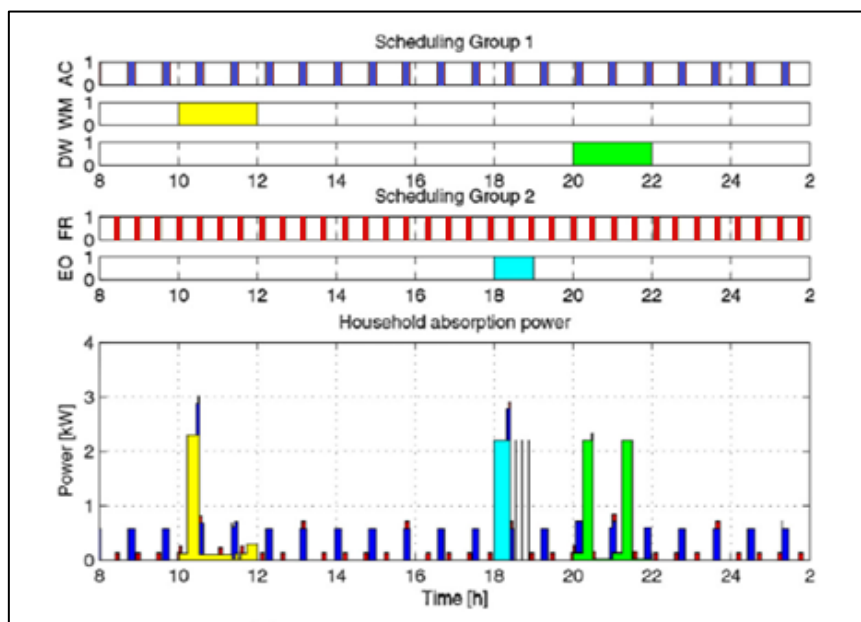


ILUSTRACIÓN 38: PERFIL DE ACTIVACIÓN TEMPORAL Y ENERGÉTICO EN EL CASO MÁS PROBABLE DE UTILIZACIÓN SIN LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO SCHEDULING.

FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES

Podemos observar dos grandes picos de demanda en la gráfica, los dos cercanos a los 3000W.

El primero se da sobre las 10:30 de la mañana donde se accionan de manera simultánea la lavadora, el frigorífico y el aire acondicionado. El segundo pico, también cercano a los 3000W aunque más pequeño que el primero, se sitúa en la franja horaria de las 18:00 hasta las 19:00 donde se accionan a la vez el horno, el aire acondicionado y el frigorífico.

A continuación se presenta el gráfico, similar al anterior pero con la utilización del algoritmo *scheduling*, nótese las interrupciones que sufren los aparatos para evitar siempre la activación simultánea dentro del mismo grupo y en la medida de lo posible entre los dos grupos:

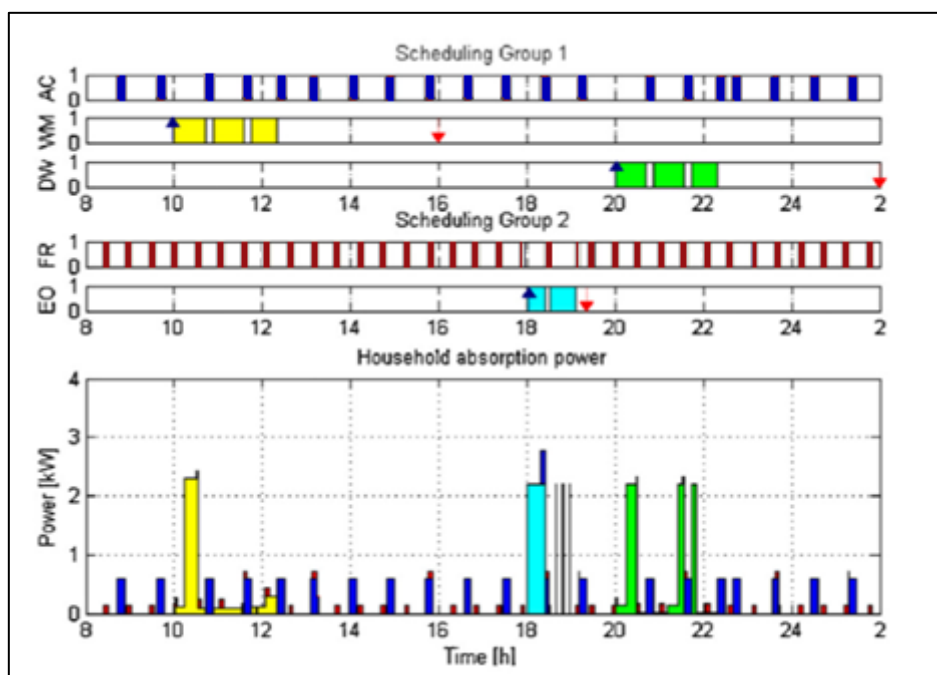


ILUSTRACIÓN 39: PERFIL DE ACTIVACIÓN TEMPORAL Y ENERGÉTICO EN EL CASO MÁS PROBABLE DE UTILIZACIÓN CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO SCHEDULING.

FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES"

Como hemos comentado, el pico máximo de demanda se sitúa cerca de las 10:30, el ahorro en el pico de la demanda energética provocado en este caso por el uso del algoritmo es:

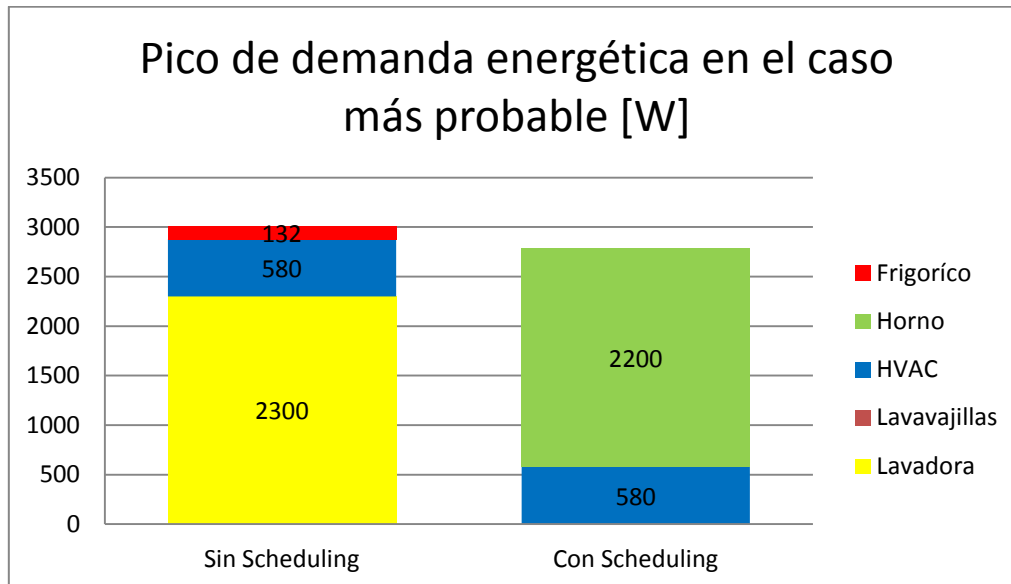


ILUSTRACIÓN 40: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL DESCENSO DEL PICO DE DEMANDA ENERGÉTICO EN EL CASO MÁS PROBABLE DE USO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Numéricamente el ahorro sería:

$$\begin{aligned} \text{Pico de demanda} &= P_{\max \sin S} - P_{\max \text{ con } S} = (2300 + 580 + 132) - (580 + 2200) \\ &= 232 \text{ W} \end{aligned}$$

Es decir, un descenso del pico de demanda cercano al 13%.

7.3.2 RESULTADOS EN EL PEOR CASO POSIBLE

En este ejemplo, se estudiará el escenario de peor caso posible en un hogar convencional. La división en dos grupos de los cinco aparatos a organizar sigue siendo la misma, al igual que su representación cromática.

El siguiente esquema representa el patrón de uso temporal y el gasto energético, sin la utilización del algoritmo *scheduling* en el peor caso posible:

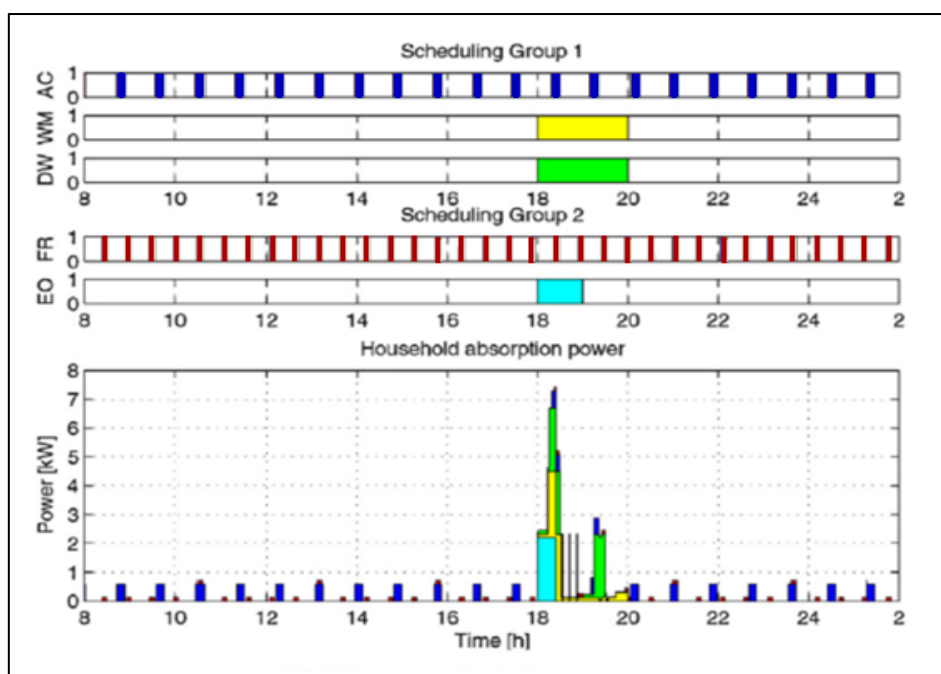


ILUSTRACIÓN 41: PERFIL DE ACTIVACIÓN TEMPORAL Y ENERGÉTICO MÁS DETALLADO EN EL CASO MÁS PROBABLE DE UTILIZACIÓN SIN LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO SCHEDULING. FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES"

Podemos observar un gran pico de demanda en la gráfica, cercano a los 7500W.

Este pico de demanda se localiza aproximadamente a las 18:30, donde se accionan de manera simultánea los cinco aparatos: la lavadora, el frigorífico, el aire acondicionado, el horno y el lavavajillas.

El siguiente gráfico representa el mismo escenario con la utilización del algoritmo *scheduling*, nótese de nuevo las interrupciones que sufren los aparatos para evitar

siempre la activación simultánea dentro del mismo grupo y en la medida de lo posible entre los dos grupos:

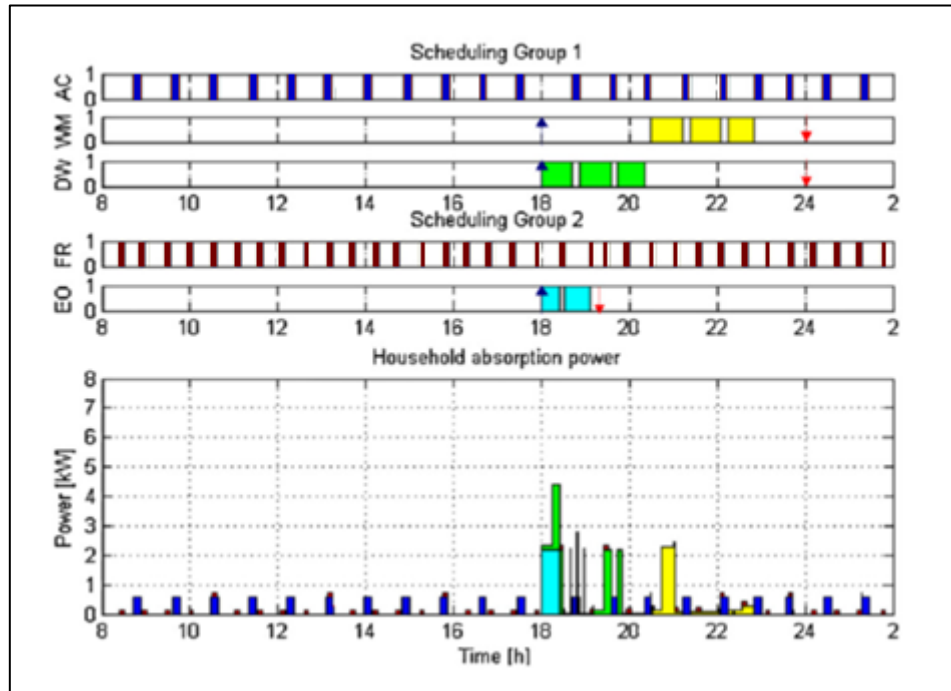


ILUSTRACIÓN 42: PERFIL DE ACTIVACIÓN TEMPORAL Y ENERGÉTICO MÁS DETALLADO EN EL CASO MÁS PROBABLE DE UTILIZACIÓN CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO SCHEDULING. FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES

El pico máximo de demanda se sitúa cerca de las 19:30, el ahorro provocado en este caso por el uso del algoritmo es:

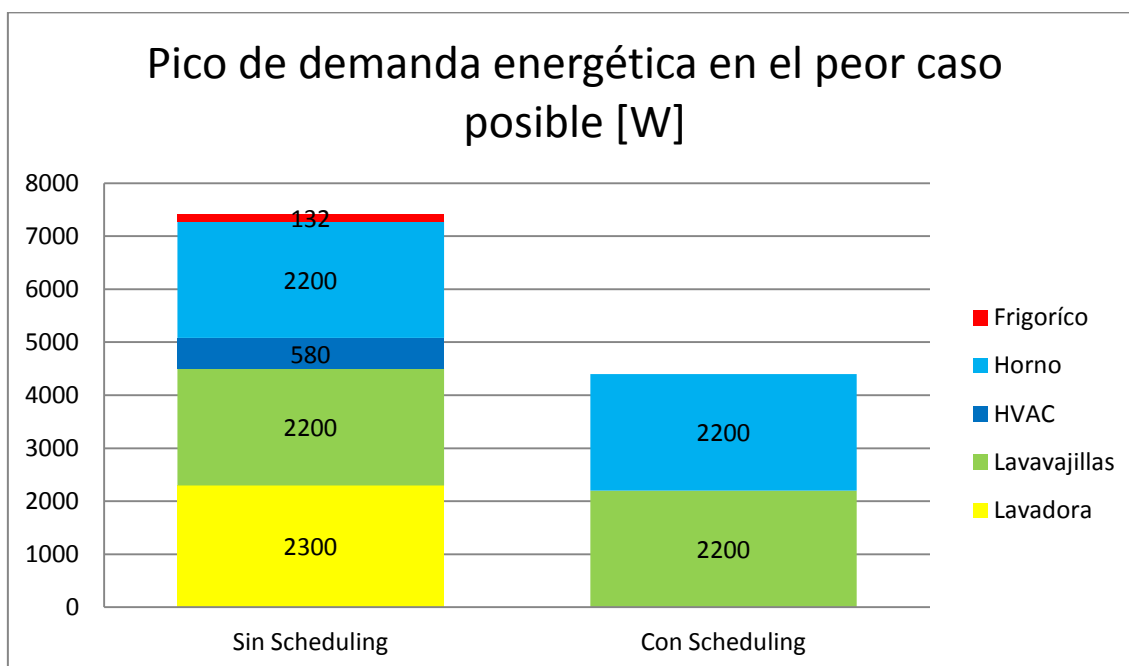


ILUSTRACIÓN 43: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL DESCENSO DEL PICO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN EL PEOR CASO DE USO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En este escenario, el pico máximo sin scheduling, como ya hemos comentado, se produce con la activación simultánea de todos los aparatos. En el caso de aplicación con algoritmo, el pico se produce con el accionamiento simultáneo del horno y del lavavajillas.

Numéricamente el ahorro sería:

$$Pico\ de\ demanda = P_{max\ sin\ S} - P_{max\ con\ S} = (2300 + 2200 + 2200 + 580 + 132) - (2200 + 2200) = 3012\ W$$

Es decir, un descenso del pico de demanda del 40%.

8 POSIBLES MEJORAS Y FUTURO DEL PROYECTO

En un futuro, con la evolución y desarrollo de herramientas que amplíen y posibiliten una mayor integración de los diferentes softwares de simulación se podrán realizar estudios y creación de modelos más exactos.

Como se ha indicado a lo largo de este proyecto y en el apartado de [3.4 Desarrollo del proyecto](#), el software de integración que estábamos usando, MLE+, discontinuó su desarrollo una vez iniciado el proyecto, imposibilitando su uso y limitando la precisión de nuestras simulaciones.

En esta sección se muestra cual puede ser el futuro de esta tecnología y como se espera que avance este proyecto una vez el software a utilizar vuelva a desarrollarse.

8.1 SIMULACIÓN DEL USO DEL ALGORITMO MEDIANTE MLE+ Y SIMULINK

El propósito principal de este proyecto, cuando empezó a desarrollarse años atrás en la Univesità di Pavia, es la implantación en hogares reales, pero antes de invertir y desarrollar instrumentos físicos que habiliten este propósito es necesario simular y confirmar el ahorro teórico que esta técnica consigue.

Como se ha comentado en la introducción, en un principio este proyecto iba a basarse en el desarrollo de la aplicación del algoritmo en programas de simulación como Simulink y MLE+.

El objetivo del uso de estos programas son varios, el principal es obtener unos datos más fiables en términos de cuantificar el descenso en el pico de la demanda por el uso del algoritmo scheduling.

Las simulaciones que se han presentado en el apartado se han realizado de manera manual, es decir, una vez modelados los aparatos y hallado el momento de uso a estudiar, se ha realizado un perfil temporal.

El modelado físico y por ende temporal de los aparatos se ha realizado en base a formulas matemáticas, el objetivo y futuro de este proyecto es crear unos modelos físicos simulados con Simulink que permitan tener unos datos más fiables.

Una vez se consigan unos modelos fiables en Simulink se pasará a la implementación con MLE+.

MLE+ es una “toolbox” integrado en Matlab/Simulink que utiliza el conocido programa EnergyPlus para la simulación de la gestión energética en edificios. MLE+ es un programa que está siendo desarrollado por la “University of Pennsylvania” y nos permite [24]:

- Diseño de controladores: Nos permite implementar controladores desarrollados y programados en Matlab o Simulink y los implementa en EnergyPlus, permitiendo la simulación energética
- Simulación y recogida de datos: Una vez realizadas las simulaciones es capaz de recopilar multitud de datos que pueden ser procesados por Matlab.

8.1.1 PASOS A SEGUIR Y EJEMPLO

Una vez explicadas brevemente las herramientas que permitirán avanzar en el desarrollo de este proyecto, resumiremos cual es el proceso a seguir para realizar unas simulaciones más precisas, paso previo a la implementación final en hogares.

Si se requiere una precisión muy alta, el hogar se puede modelar con cualquier programa de creación de edificios, en este caso se utilizó DesignBuilder, un programa más orientado a la arquitectura que permite crear edificios con gran detalle.

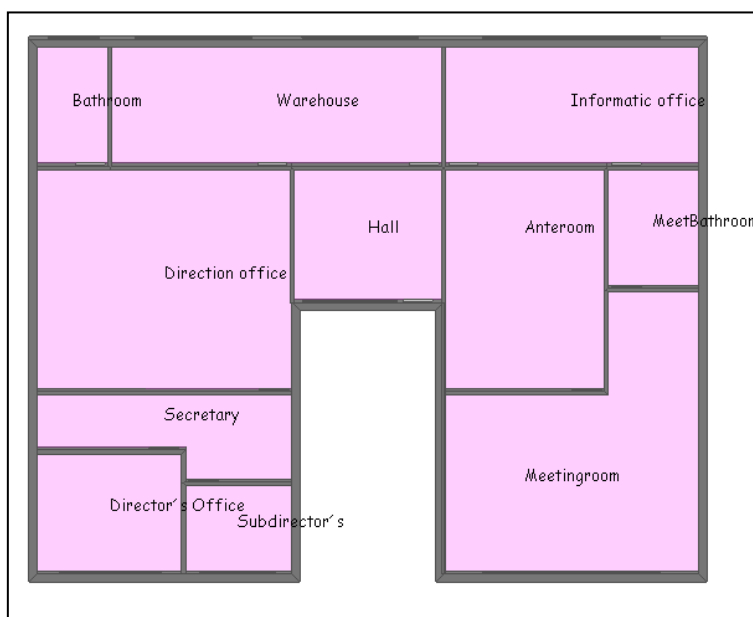


ILUSTRACIÓN 44: PLANTA DEL EDIFICIO CREADO CON DESIGNBUILDER EN LA INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA DE LAS SIMULACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

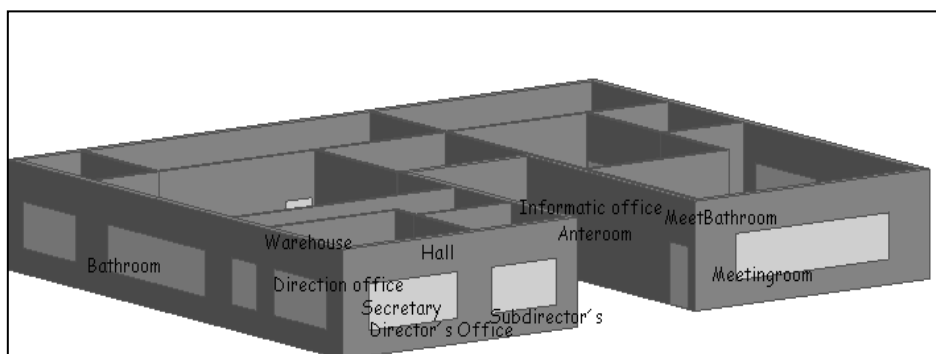


ILUSTRACIÓN 45: VISTA DEL EDIFICIO CREADO CON DESIGNBUILDER EN LA INVESTIGACIÓN PARA LA MEJORA DE LAS SIMULACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Una vez creado el edificio, DesignBuilder permite enviar el archivo .idf, donde se encuentran todas sus especificaciones técnicas a EnergyPlus, herramienta que permite la simulación de parámetros físicos del edificio conjuntamente con MLE+.

El hecho de obtener las variables físicas del edificio son claves para el modelado correcto de los aparatos, como pudimos comprobar en [6.2.1 Modelado físico de aparatos TT \(Time-Triggered\)](#).

Con estos datos y con los aparatos debidamente modelados, sería el momento de diseñar un controlador usando Matlab, que implemente el algoritmo scheduling, apagando y encendiendo los aparatos modelados según considere oportuno para disminuir el pico de demanda energética.

Este controlador se implantaría en unas “regletas” que se están desarrollando en la Università di Pavia, equipados con [25]:

- Medidores de voltaje
- Medidores de corriente
- Reles para activar o desactivar la corriente de energía
- Un Arduino para el sistema de entradas y salidas
- Una Raspberry Pi con Linux

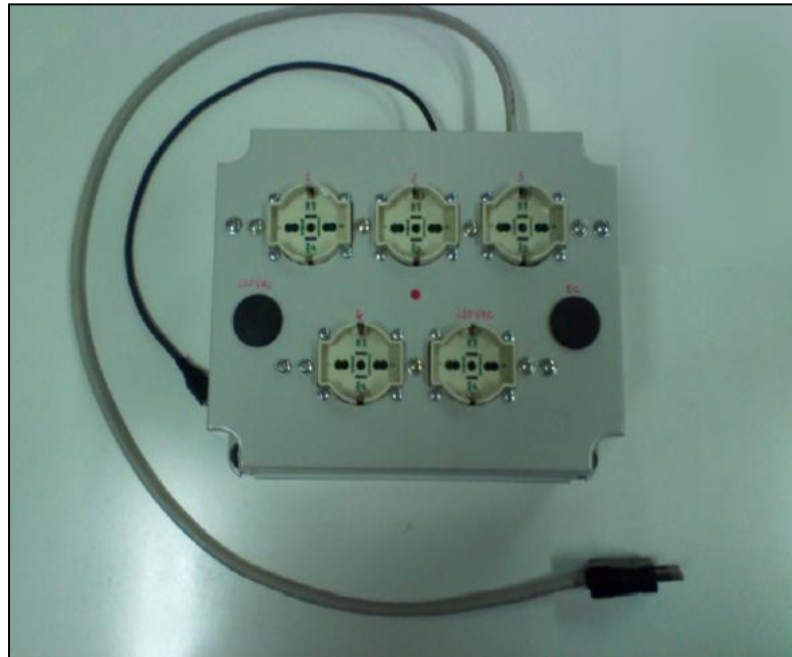


ILUSTRACIÓN 46: IMAGEN DE LA REGLETA DISEÑADA POR LA UNIVERSITÀ DI PAVIA PARA LA IMPLANTACIÓN DEL ALGORITMO. FUENTE: TULLIO FACCHINETTI: “REAL-TIME PHYSICAL SYSTEMS: ENERGY EFFICIENCY AND LOAD MANAGEMENT IN THE MODERN SMART GRID”

Una vez diseñado ese controlador, se utilizaría el programa MLE+ que nos permite simular y obtener unos valores en la demanda energética muy cercanos a los que se obtendrían en un hogar real.

EJEMPLO DE USO CON AIRE ACONDICIONADO

A día de hoy, solo se ha conseguido modelar con éxito el sistema de aire acondicionado, en el desarrollo de este proyecto se trabajó con el modelado realizado en [26] y se modificó con el fin de dominar y entender bien su funcionamiento.

A continuación se muestra brevemente un sistema que controla el aire acondicionado, apagándolo y encendiéndolo según el momento del día y la temperatura exterior, en función de unos límites tanto inferiores como superiores de temperatura.

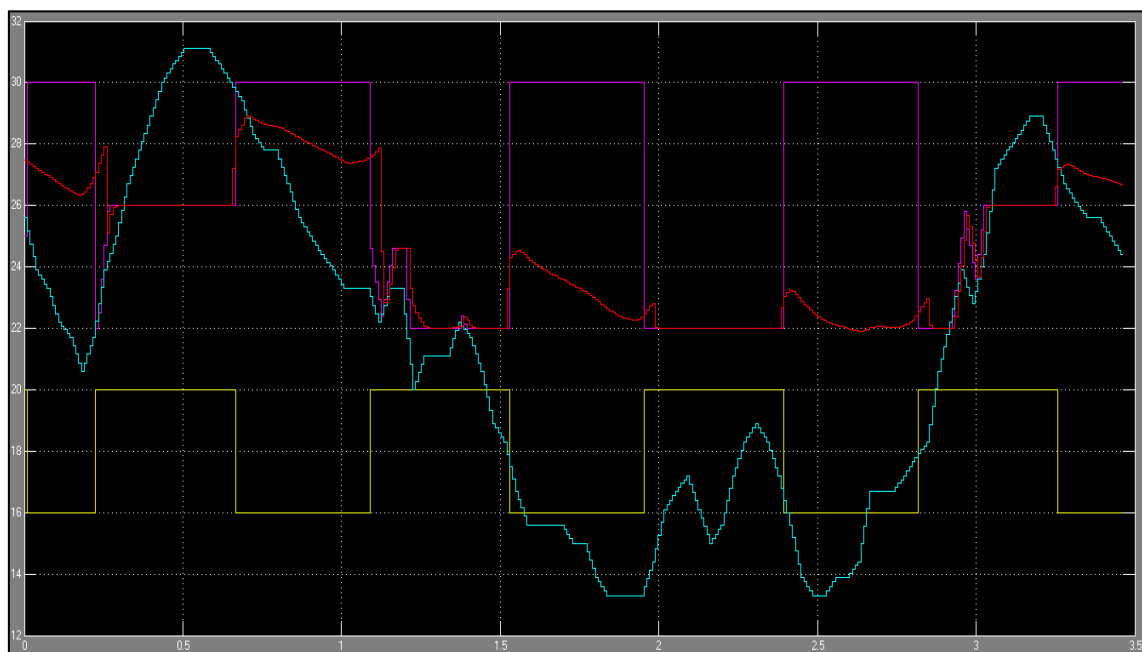


ILUSTRACIÓN 47: SALIDA DE LA SIMULACIÓN DEL CONTROL DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO CON MLE+ Y SIMULINK. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Siendo:

- Amarillo: Límite inferior de temperatura
- Morado: Límite superior de temperatura
- Azul: Temperatura exterior
- Rojo: Temperatura interior del hogar.

8.2 IMPLANTACIÓN DEL ALGORITMO EN VARIOS EDIFICIOS SIMULTÁNEAMENTE O EN GRANDES EDIFICIOS

En el documento [15] se puede observar como la Universit  di Pavia está investigando a su vez la implantación de este algoritmo en varios edificios de manera simultánea.

La lógica que se sigue en estos casos es exactamente igual, se modelan los aparatos, se agrupan en diferentes conjuntos de tareas planificables individualmente, se obtiene patrones de uso temporales (exactamente los mismos que los hallados en este informe) y se hace una aproximación de cuanto será el descenso del pico de demanda.

La  nica diferencia respecto al uso individual es la necesidad de una unidad de procesamiento mucho mayor, que permita ejecutar y ordenar todas las tareas sin provocar fallos en el sistema.

Hasta el momento, el número máximo de edificios que se ha llegado a controlar sin perder eficiencia en el uso del algoritmo han sido cinco, con sus correspondientes cinco aparatos por hogar.

Este ejemplo nos permite imaginar cual será el ahorro si este algoritmo se aplicase en grandes edificios, con gran cantidad de hogares individuales. Como podemos ver en la siguiente ilustración, el uso del algoritmo en cinco hogares simultáneamente en el peor caso de uso, ha permitido un descenso en el pico de demanda de un 46%, lo que se traduce en un descenso aproximado de 17000 W.

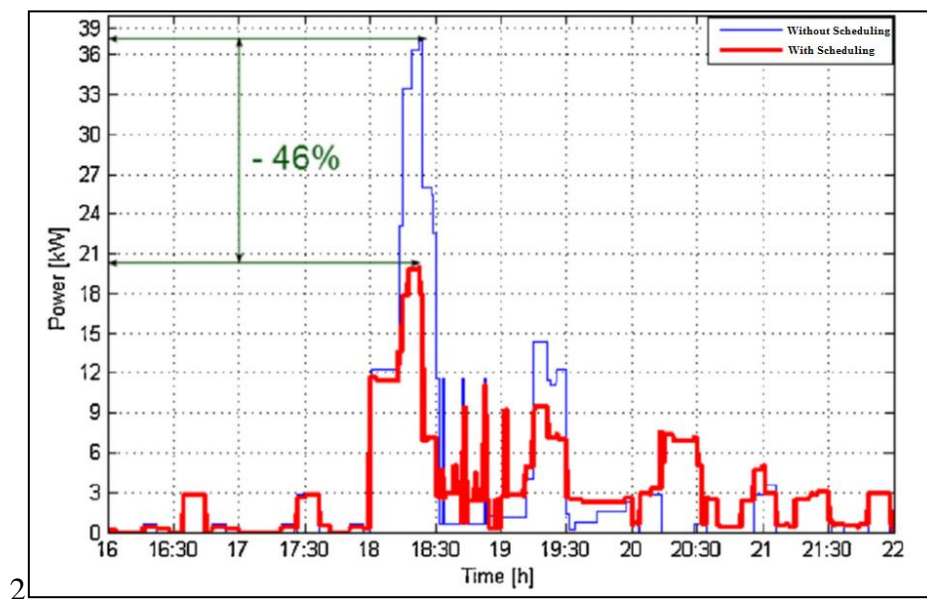


ILUSTRACIÓN 48: DESCENSO TEÓRICO DEL PICO DE LA DEMANDA EN EL PEOR CASO POSIBLE EN UN ESCENARIO DE CINCO HOGARES SIMULTANEOS. FUENTE: D. CAPRINO, M. L. DELLA VEDOVA AND T. FACCHINETTI, "PEAK SHAVING THROUGH REAL-TIME SCHEDULING OF HOUSEHOLD APPLIANCES

Otros estudios como han obtenido grandes resultados con el uso de este algoritmo, como por ejemplo [17], obteniendo reducciones del pico de la demanda en un sistema de 100 aires acondicionados a la vez.

9. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha desarrollado un estudio sobre la bajada del pico de la demanda energética mediante el uso de algoritmos de tipo scheduling.

Este descenso realizado a gran escala significaría un gran ahorro a las empresas energéticas, a los consumidores y al medio ambiente.

Esta bajada del pico de demanda se ha realizado desplazando el uso de los electrodomésticos más comunes en un hogar a franjas horarias donde la demanda del sistema general de energía es menor, evitando el uso simultaneo de dichos aparatos en la medida de lo posible, lo que consigue suavizar la curva de la demanda.

Para poder utilizar los algoritmos de tipo scheduling, muy comunes en la informática, en el ámbito de la gestión activa de la demanda (GAD), los electrodomésticos deben ser modelados tanto física como temporalmente, lo que permite su planificación mediante el algoritmo.

En este proyecto se han realizado simulaciones teóricas del ahorro que se produciría en dos escenarios diferentes.

La primera simulación se ha realizado en el escenario más probable de un hogar estándar, calculado mediante el estudio de patrones de uso; el segundo se ha realizado en el peor escenario posible, es decir, el más exigente con el algoritmo.

Los resultados demuestran un descenso teórico del pico de la demanda energética del 13% en el escenario más probable y de hasta un 40% en el peor caso posible.

Estos resultados deben ser confirmados mediante software de simulación más avanzados, los cuales se analizan durante este proyecto, antes de ser utilizados en un escenario real.

De corroborarse los buenos resultados obtenidos en las pruebas teóricas, esta tecnología podría suponer una gran revolución tanto para las empresas energéticas como para sus consumidores y el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea, "Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática," 2013.
- [2] Agencia EFE, "La población mundial crecerá hasta los 9.600 millones de personas en 2050," *Diario ABC*, 15 Junio 2013.
- [3] M. Á. Noceda, "La subasta eléctrica desaparece en abril," *Diario El País*, 8 Febrero 2014 .
- [4] Europa Press, "El déficit de tarifa eléctrica ascendió a 4.098 millones en 2013, más de lo previsto," *El Economista*, 17 Febrero 2014.
- [5] IDAE, "Estudio sobre Consumo Energético del Sector Residencial en España," 2013.
- [6] Red Eléctrica Española (REE), "El sistema eléctrico español," 2013.
- [7] M. Vallés Rodríguez, P. Frías Marín, P. Reneses Guillén and L. González Sotres, "Gestión Activa de la Demanda para una Europa más eficiente," *Revista Anales*, vol. XCI, no. IV, 2013.
- [8] Iberdrola, "Gestión Activa de la demanda energética," Valencia, 2011.
- [9] Comunidad de Madrid; Energy Management Agency;, "Guia Básica de la gestión de la demanda energética," 2007, Madrid.
- [10] Wikipedia, "Wikipedia," [Online].
http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_tiempo_real.
- [11] WordReference, "WordReference," [Online].
<http://www.wordreference.com/es/translation.asp?tranword=scheduling>.

- [12] A. Arezou Mohammadi and G. Selim, "Scheduling Algorithms for Real-Time Systems," Queen's University, Kingston, Ontario, 2005.
- [13] T. Facchinetti, "Real-time Systems Introduction," Pavia, 2013.
- [14] G. C. Buttazzo, "Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications," Springer Science & Business Media, 2011.
- [15] T. Facchinetti, "Classical scheduling algorithms," Pavia, 2013.
- [16] C. Liu and J. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment," *Journal of the ACM*, 1973..
- [17] G. C. Buttazzo, "Rate Monotonic vs. EDF: Judgment Day," Università di Paiva, 2005.
- [18] "PRICE Project," [Online]: <http://www.priceproject.es/es/objetivos>.
- [19] ENDESA, "Gestión de la demanda en el proyecto SMART CITY," 2010.
- [20] M. L. D. Caprino, D. Vedova and T. Facchinetti, "Peak shaving through real-time scheduling of household appliances," *ELSEVIER*, vol. Energy and Buildings, no. 75, pp. 133-148, 2014.
- [21] M. Della Vedova and T. Facchinetti, "Feedback scheduling of real-time physical systems with integrator dynamics," in *17th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2012.
- [22] D. V. M.L and F. T, "Real-time scheduling for peak load reduction in a large set of HVAC loads," in *Proceedings of the Third International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies (Energy)*, 2013.
- [23] L. A, M. S and M. M, "Two-dimensional packing problems: a survey," *European Journal of Operational Research*, vol. 2, no. 141, pp. 241-252, 2002.



- [24] "MLE+: a Matlab-EnergyPlus Co-simulation Interface," [Online]. Available:
<http://www.seas.upenn.edu/~nghiem/mleplus.html#usecase>.
- [25] T. Facchinetti, "Real-Time Physical Systems: Energy Efficiency and Load Management in the modern Smart Grid".
- [26] W. Bernal, M. Behl, T. X. Nghiem and R. Mangharam, "MLE+: A Tool for Integrated Design and Deployment of Energy Efficient Building Controls," Department of Electrical and Systems Engineering, University of Pennsylvania.
- [27] C. Liu and J. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment," *Journal of the ACM*, 1973.